



TITLE:

# 土壌水分モニタリングシステムを用いた湿潤熱帯傾斜畑における土壌浸食発生過程の解析

AUTHOR(S):

舟川, 晋也

---

CITATION:

舟川, 晋也. 土壌水分モニタリングシステムを用いた湿潤熱帯傾斜畑における土壌浸食発生過程の解析. 2004

ISSUE DATE:

2004-01

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/80162>

RIGHT:

土壤水分モニタリングシステムを用いた  
湿潤熱帯傾斜畑における土壤侵食発生過程の解析

(課題番号 12460032)

平成 12 年度～平成 14 年度 科学研究費補助金 (基盤研究(B)(2))

研究成果報告書

平成 16 年 1 月

研究代表者 舟川 晋也

(京都大学大学院農学研究科助教授)



## はしがき

私が焼畑農業の研究に携わるようになってから 10 年以上がたつ。その間に、特にインドシナ半島山間地では、政治・社会情勢の安定化　それ自体はもちろん喜ぶべきことであるが　を受けて、急速に貨幣経済が浸透していった。そしてこの趨勢は、今まで多くを自給的食糧生産に負っていた焼畑農耕民の生活をも一変させている。道路などのインフラ整備に伴い商品作物の栽培が広く浸透し、急峻な斜面は毎年耕され、モンスーンの雨は豊かな表土を洗い流すようになった。森林を希少な資源と見なすようになった低地民や中央政府との競合関係は、これまで長く持続的であったような土地利用の継続　十分な休閑期間の維持　を困難なものとしている。母岩が露出した乾季末の斜面を見てみれば、科学的知見など待たなくとも、「この土地・農業はこのままで持つのだろうか？」という疑念を生じさせるのに十分であろう。

一方これより一昔前、本来水田の民であったタイ人の活動も、山間地・傾斜地へと拡大していった。もともと資本もなく農村の人口圧に押し出されるようにして辺境へ向かった彼ら、傾斜地利用の経験の少なかった彼らに、土地を痛めずに利用するための方策がそれほど持たされていたとは思えない。さらに今日では、傾斜地の多くはサトウキビ等商品作物生産の場となっており、農民が土地利用を選択する際最も重要なインセンティブは「儲け」である。開拓後放棄されたことも少なくなかったであろう傾斜地の畑作が、今日耕地生態学的な観点からどの程度の持続性を維持しているのか、もう一度振り返ってみる時期にきているといえるだろう。

一時さかんに喧伝された「焼畑農耕の森林破壊元凶論」であるが、近年ではさすがにそのような一方的ないわれ方はされなくなってきたようである。私自身は、特にカレン人らによるモンスーン・アジアの焼畑農耕は、その生態環境に適応した、大変優秀なシステムであったと信じている。しかしながら、現在のような急激な変化にさらされて無傷であるような生産システムは、先進国の農業を見渡しても、そう簡単には見つかるまい。貨幣経済に巻き込まれた焼畑農耕が直面している危機は、そして大規模に開発された傾斜地畑作が抱えている問題も、構造的には環境を虐げつつ経済的利益を挙げることを強いられている今日の「グローバル化した」農業の一局面であると見なすべきであろう。私は、そのような「環境という弱者」からの搾取を押しとどめるような、生態論理にのっとった資源利用　農業　の本質を見出したい。焼畑農耕の過去と現在は、不遜な言い方ではあるが、そのための格好の材料を提供してくれるであろう。

焼畑農耕というような人々のいわば生業を学術的な研究対象とする場合、おそらく二通りの関わり方・立場があろう。一つめは、これまでのシステムの持続性を保証してきた本質的な要素は何か、それがどのような生態学的基盤、文化的基盤、技術的な基盤の上に成立してきたのか将来のためにも明確にしていこう、という「過去に学ぶ」問題意識である。もう一つは、現状に至った経緯はひとまずおいておき、現在直面している問題に解決を与えていこう、という「問題解決技術志向型」の立場である。私自身の指向性は前者に近いが、本研究ではあえて後者の立場を選択した。「土壌侵食」は、傾斜地農業が危機的状況に陥って初めて顕在化するものであるため、伝統的な農耕技術からその抑制手法を学ぶということが難しい。たとえば土壌有機物の管理手法ならば、休閑森林の役割は「年間何 ton/ha

の有機物の生産・土壌への還元」という表現で他技術に転用可能であろうが　例えばアグロフォレストリー・システムは空間的に再配列された休閑システムと認識することが可能である　、侵食防止を考えたときには「被覆が大切」という認識を深めさせる程度である。また「不耕起栽培」に見られるように伝統的な焼畑が優れているのはわかっているが、これを商業化された傾斜地農業で実践するのは難しい。このように侵食に関しては、森林休閑システムと常畑化された傾斜地農業の間には大きな断絶がある。そしてこのことが、土壌侵食を題材とした本研究で、あえて「過去に学ぶ」アプローチをとらなかった理由である。

本研究は、モンスーン・アジアで侵食防止技術が具備すべき条件を、この地域特有の気象条件・分布土壌に即した形で示すことができないか、という問題設定で、表面流去水の発生条件を検討することを目的とした。問題設定の性格上、現地圃場での実測が重要な要素であった。本研究遂行に際して、現地での計測に協力いただいたタイ国コンケン県サムジャン村、メイホンソン県ナムリン村および同県ドゥラパ村の農民の方々に厚くお礼を申し上げますとともに、本研究の成果を実践可能な形に翻訳していきたい　具体的な技術要素として農民の方々と考えていきたい　と考えながら、本稿をとりまとめたところである。

舟川晋也

[研究組織]

研究代表者	舟川晋也	京都大学大学院・農学研究科・助教授
研究分担者	田中 樹	京都大学大学院・地球環境学堂・助教授
	平井英明	宇都宮大学・農学部・助教授
	田中壮太	高知大学・農学部・助手
海外共同研究者	Thammanoon Kaewkhongkha	タイ国農務省・研究官
	Sivapong Naruebal	タイ国農務省・研究官
	Heru Bagus Pulunggono	ボゴール農科大学・農学部・講師
( 研究協力者	南 隆明	京都大学大学院・農学研究科
	林 慶一	京都大学大学院・農学研究科)

[交付決定額] (配分額)

(金額単位：千円)

	直接経費	間接経費	合 計
平成 12 年度	5,600	0	5,600
平成 13 年度	1,300	0	1,300
平成 14 年度	1,400	0	1,400
総 計	8,300	0	8,300

[研究発表]

口頭発表

林慶一・舟川晋也・小崎隆、タイ北部焼畑農業下の土壌有機物動態～休閒の機能～、  
2003 年日本土壌肥料学会、2003 年 8 月 22 日

Yoshikazu Hayashi・Sivapong Naruebal・Shinya Funakawa、Soil organic matter  
dynamics under shifting cultivation in northern Thailand、Interdisciplinary workshop  
on the forest dynamics of Thailand、2003 年 11 月 28 日

## 目 次

第 1 章	はじめに	1
第 2 章	調査地の概要および研究方法	3
2 . 1	調査地の概要	3
2 . 2	圃場における水分動態の測定	7
第 3 章	結果および考察	9
3 . 1	土壌の理化学性および物理性	9
3 . 2	調査地の気象・降雨特性の検討	10
3 . 3	タイ国東北部低標高地 SJ のサトウキビ植栽砂質土壌における水分動態の検討	15
3 . 4	タイ国北部中山間地 NR の裸地管理土壌における水分動態の検討	16
3 . 5	タイ国北部高標高山間地 DP の陸稲植栽焼畑耕地土壌における水分動態の検討	17
3 . 6	統計解析に基づく土壌断面からの水分損失発生量および表面流去水発生量 規定要因の検討	51
3 . 7	雨季全般を通した水分動態の検討	55
3 . 8	雨季全般を通した表面流去水発生条件の検討	56
第 4 章	おわりに 表面流去水発生抑制の指針とともに	67







## 第1章 はじめに

これまで東南アジア山間地に居住する少数民族の主要な農業形態は、傾斜地において数年間の耕作とより長期の休閑を繰り返す shifting cultivation(焼畑農業)と呼ばれる比較的粗放な畑作であった。しかしながら近年では、人口圧の増大や市場経済の浸透を通して、農地の拡大あるいは既存耕地における休閑期間の短縮の傾向が一般化しており、これが熱帯林破壊や農耕地の土地生産性低下の一因となっている。土地利用圧の増大に伴い顕在化する問題の一つに、土壌侵食の加速がある。土壌侵食によって、農業生産の基盤となるべき肥沃な表層土が物理的に失われてしまうことから、その対策法の確立が急務となっている。しかしながら土壌侵食の発生には、降雨強度などの気象因子、耕地の斜度や斜面長、耕起状況などの立地条件に関する因子、土壌団粒の安定性や粒子の分散性などの土壌因子が複雑に関与するため、その回避技術の一般化は困難となっている。例えば最もよく知られた土壌侵食予測式である Universal Soil Loss Equation では、土壌侵食量は、

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

というような表現を与えられている。ここで  $A$  は土壌侵食量、 $R$  は降雨強度に関する因子、 $K$  は土壌側の受食感受性に関する因子、 $L$  は斜面長に関する因子、 $S$  は斜度指標、 $C$  は土壌の保護被覆に関する指標、 $P$  は侵食防止のための保全管理に関する項である(Wischmeier and Smith 1978; Sonneveld and Nearing 2003)。

本研究では前述の諸因子のうち、地域による侵食発生条件の違いをもたらす気象因子と土壌側の因子に着目し、土壌侵食発生と密接な関係を持つと考えられている表面流去水発生条件を定量的に表現・解析することを目指した。調査地点としてモンスーン気候下のタイ国北部・東北部の傾斜畑3点を選択し、小区画(1 m 四方あるいは 2.5 m 四方)の土壌侵食試験プロットに設置したデータロガーによって、降水量、土壌水分量、表面流去水量を 10 分間隔で経時的に記録・解析し、降雨由来の水を土壌水分増加量、表面流去水、損失量に分配した上で、土壌水の損失速度、表面流去速度、およびそれらの発生条件を降雨強度、初期土壌体積含水率などの関数として求めた。さらにこれらの結果に基づき、気象・土壌因子の表面流去発生への寄与を明らかにするとともに、それぞれの地域において侵食回避のための技術が具備すべき基本的条件を明確化することを試みた。



## 第2章 調査地の概要および研究方法

### 2.1 調査地の概要

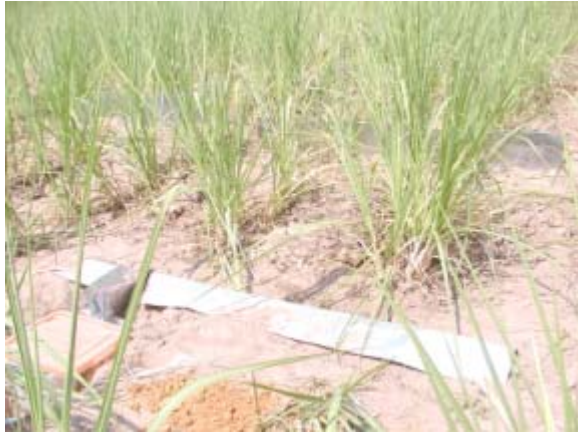
本研究の調査対象地として、以下の3地点を選定した(図1)。

- 1) 調査地1：タイ国東北部コンケン県サムジャン村(以下 SJ 村・写真 1a～c)。標高約 300 m のゆるやかな丘陵地帯(傾斜は 3%程度)で、低地では水稲が、また傾斜地ではサトウキビが連続的に耕作される。土壌は極めて砂質であり、緩傾斜にも関わらずしばしばガリー状の侵食跡が見られる。本調査地の土壌は、米国農務省の Soil Taxonomy (Soil Survey Staff 1999)によれば Typic Ustipsamments に分類される。本研究では、サトウキビ植栽斜面中程に、2.5 m×2.5 m のプロットを作成した。本プロットでは、調査期間中にサトウキビが生長し、その背丈は乾季3月に 30 cm 程度、8月に 2 m 超、雨季末 11 月には 3 m に達した。
- 2) 調査地2：タイ国北部メイホンソン県ナムリン村(以下 NR 村・写真 2a～c)。標高約 800 m の山間地に位置する。北部タイの中心都市チェンマイまでの交通の便がよく、また酸性害の出にくい石灰岩母材土壌が広く分布するため、ハクサイ、トマトなどの高冷地野菜が多く生産される。本調査地の土壌は Udic Haplustalfs に分類される。本村には近年ビルマ側より移住してきたリス人が居住する。この民族は積極的に商品作物を導入する傾向がある。本研究では、ここ数年連続的に陸稲を作付けしている耕地に、1 m×1 m のプロットを作成した。ただし本研究遂行期間中は裸地状態で管理した。なお調査地点の傾斜は約 20 度である。
- 3) 調査地3：タイ国北部メイホンソン県ドゥラパ村(以下 DP 村・写真 3a～c)。標高約 1,200 m の急峻な山間地に位置するカレン人焼畑農村耕地に調査地を設置した。本村では1年



図1 . 調査地 .

a)



b)



c)



写真 1 . SJ調査地乾季末 3 月(a)  
および雨季 8 月(b)の景観と  
土壌断面(c)

a)



b)



c)



写真2 . NR調査地乾季末3月(a)  
および雨季8月(b)の景観と  
土壌断面(c)



a)



b)



c)



写真3 . SJ調査地乾季末4月(a)  
および雨季8月(b)の景観と  
土壌断面(c)

耕作(陸稲)/7~8年休閑を繰り返す循環型焼畑耕作が行われているが、この休閑期間の長さは現状ではタイ国北部で最長の部類に入るであろう。土壌母材は主として砂岩、泥岩、花崗岩などであり、土壌はおおむね中粒質である。本調査地の土壌は Ustic Haplohumults に分類される。耕地の多くは傾斜 20~30 度という極めて急峻な斜面上にある。本研究では、7年休閑後開畑した陸稲植栽耕地に、1 m×1 m のプロットを作成した。プロットにおける傾斜は 30 度と、調査対象地の中で最も急峻である。なお本プロットにおける陸稲生長は、雨季中期の 8 月で膝下程度、収穫期で腰高程度であった。

## 2.2 圃場における水分動態の測定

前述の 3 調査地において、小区画(DP および NR では 1 m 四方、SJ では 2.5 m 四方)の水分動態測定用プロットを各 2 連で作成した(前掲写真 1~3 参照)。いずれのプロットにおいても、上部から表面流去水が流入しないようにプロット上端をブリキ板で区切っている。このプロット内で発生した表面流去水を全て集めた上で、掘り下げたプロット下部に自作の表面流去水測定ゲージ 転倒式雨量升と同様の原理を用い、升に取り付けた磁石の通過時におけるリードスイッチのオン・オフの回数を計測する(写真 4) を設置した。なお表面流去水測定ゲージ各々についてカリブレーションを行ったが、測定可能水量は約 50 mL/回であり、これは 1 m×1 m プロットで 50 mL/m<sup>2</sup> あるいは 0.05 mm 相当の、また 2.5 m × 2.5 m プロットで 8 mL/m<sup>2</sup> あるいは 0.008 mm 相当の表面流去水となる。

これら計 3 地点 6 プロットに米国キャンベル社製データロガー CR-10X を設置し、雨季を通して、10 分間隔で降雨量(転倒式雨量升による)、土壌体積含水率(TDR 法による)、表面流去水量(上記表面流去水測定ゲージによる)を計測した。なお TDR プローブによる計測値(パルス往復平均時間)と土壌体積含水率の関係は、各地点で個別にカリブレーションを行って求めた。

## 2.3 土壌の理化学性、物理性の測定

調査地土壌各層位より、100 mL コアサンプラーを用いて未攪乱土壌試料を各 2 連で採取した。これを用いて、土壌の三相分布、仮比重、飽和透水係数(定水位法による)、pF - 水分曲線を求めた。また風乾細土(< 2 mm)を用いて、土壌の粒径分布(篩別法による)、有機炭素含量(NC analyzer を用いた乾式燃焼法による)を求めた。



写真 4 . 表面流去水測定  
ゲージ .





### 第3章 結果および考察

#### 3.1 土壌の理化学性および物理性

表1に調査土壌の理化学性を、また図2にpF - 水分曲線を示した。ここに見られるように、SJ 土壌は極めて粗粒質で有機物に乏しい。また仮比重が大きく、透水係数も他の2土壌と比べて一桁程度小さい。一方NR 土壌、DP 土壌は、特に表層土で有機物に富み、粘土含量も40%以上と大きい。これらの土壌は、60%以上程度の比較的大きな孔隙率、高い毛管水保持量(> 40%)、比較的良好な物理性によって特徴づけられる。

ここで土壌の保水性を見ると、NR および DP 土壌では毛管孔隙上限のpF 1.8における水分保持量が40%超と比較的高いのにに対し、SJ 土壌では25%程度と小さな値をとる。しかしながら、NR・DP 土壌では、pF4.2以上の高ポテンシャル領域の水がSJより高くなるため、必ずしもSJ 土壌の毛管水保持容量が小さくなるわけではない。ここではこれら毛管水上限における水分保持量が、後に検討する現場での最大水分保持量にほぼ等しくなる値だという点に注意しておきたい。

表1. 調査土壌の理化学性.

	Depth	Bulk density	Solid phase	Total porosity	Moisture retention at pF 1.8	Saturated hydraulic conductivity	Particle size distribution			Total C
	(cm)	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)	(%)	(%)	(m/sec)	sand (%)	silt (%)	clay (%)	(g/kg)
SJ	0-7	1.41	51.9	48.1	24.8	1.2E-05	88	5	3	2.71
	7-15	1.56	57.5	42.5	26.3	6.4E-06	89	6	5	1.22
	15-30	1.72	64.2	35.8	25.5	7.5E-06	86	6	7	0.24
	30-45	1.80	68.2	31.8	24.0	1.1E-06	80	5	12	0.53
NR	0-15	0.98	34.1	65.9	42.6	6.1E-05	23	20	57	33.37
	30-40	1.09	36.6	63.4	44.6	1.9E-05	23	11	66	14.10
DP	0-15	0.83	29.2	70.8	43.7	5.8E-05	40	13	47	43.51
	30-40	1.23	45.1	54.9	39.4	2.5E-05	36	13	51	19.71

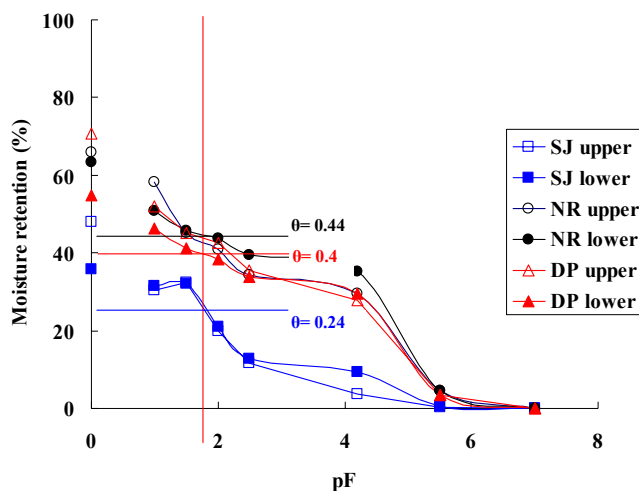


図2. 調査土壌の pF - 水分曲線.

### 3.2 調査地の気象・降雨特性の検討

調査期間(DP では 2001 年、SJ および NR では 2002 年)の全般的な気象条件を検討するため、モニタリングデータの日平均値を図 3 に示す。それぞれの調査地点について、以下のような事実が読みとれる。

- 1) SJ では、雨季初期の降雨期に続き 6 月中旬から 7 月下旬にかけて少雨期が見られること(それに応じて土壌も乾燥する)、8 月中旬の強い雨を待って下層土がほぼ連続的に毛管飽和された状態となること( $\theta \geq 0.25$ )、雨季を通して降雨後数日で表層土は乾燥傾向にあることなどがわかる。なお本地点では、機器トラブルのため、9 月上旬に半月ほどデータ欠損期間がある(図 3a)。
- 2) NR では、5 月 10 日過ぎに下層土で毛管飽和となっている。6 月後半から 7 月はデータ欠損期であるが、前後の土壌水分環境から見て、下層土では毛管飽和の状態が継続したものと考えられる( $\theta = 0.4$ )。一方表層土では、毛管孔隙が継続的に水飽和されることはほとんどなく、良好な内部排水が確保されていたものと見られる(図 3b)。
- 3) DP では、データ欠損期はあるものの、6 月初旬から 10 月下旬まで表層土・下層土ともに、ほぼ毛管が水飽和された状況( $\theta \geq 0.4$ )で推移している(図 3c)。

また各調査地点の降雨特性を見るために、季節毎(雨季前半、雨季後半、乾季前半、乾季後半のそれぞれ 3 ヶ月づつ)の強度別累積降雨量(棒グラフ)および雨季前半と後半における強度別降雨寄与率(円グラフ)を示す(図 4)。SJ については 2002 年・2003 年の 2 年分のデータを、NR については 2000 年・2002 年の 2 年分のデータを、また DP については 1999 年～2001 年の 3 年分のデータを解析した。さらに比較のために、インドネシア国西ジャワ州ボゴール(熱帯多雨林気候)、同国東ジャワ州パチェット(熱帯モンスーン気候)、および同国東カリマンタン州サマリンド(熱帯多雨林気候)において収集した同種のデータを併せて解析した。その結果、データに欠損部分はあるものの、調査地域の降雨特性について以下の点が明らかとなった。

- 1) 標高 1,200 m の耕地に位置する DP では、10 分間降雨が 1 mm 未満の弱い降雨が全体の降雨量の概ね 50%以上を占める。一方東北タイ低標高地に位置する SJ では、5 mm/10 分を超える強い降雨、2～5 mm/10 分程度の降雨、2 mm/10 分未満の弱い降雨が、ほぼ同程度づつ分布しており、これはインドネシア国熱帯地域とも共通の特徴である。標高 800 m の NR の降雨強度分布は、前 2 者の中間程度と見ることが出来る。
- 2) 特に DP の特徴であるが、雨季前半と比べて、雨季後半に強度の大きい降雨が増加する。5～7 月の雨季前半には 5 mm/10 分を超える強い降雨はほとんど見られないのであるが、8～10 月の雨季後半には、このような強い降雨がしばしば見られる。このような傾向は低標高地帯 SJ およびインドネシア国熱帯地域では認められず、NR でもはっきりした傾向としては現れない。よってタイ国の高標高地に特有な降雨特性であると考えられる。

SJ

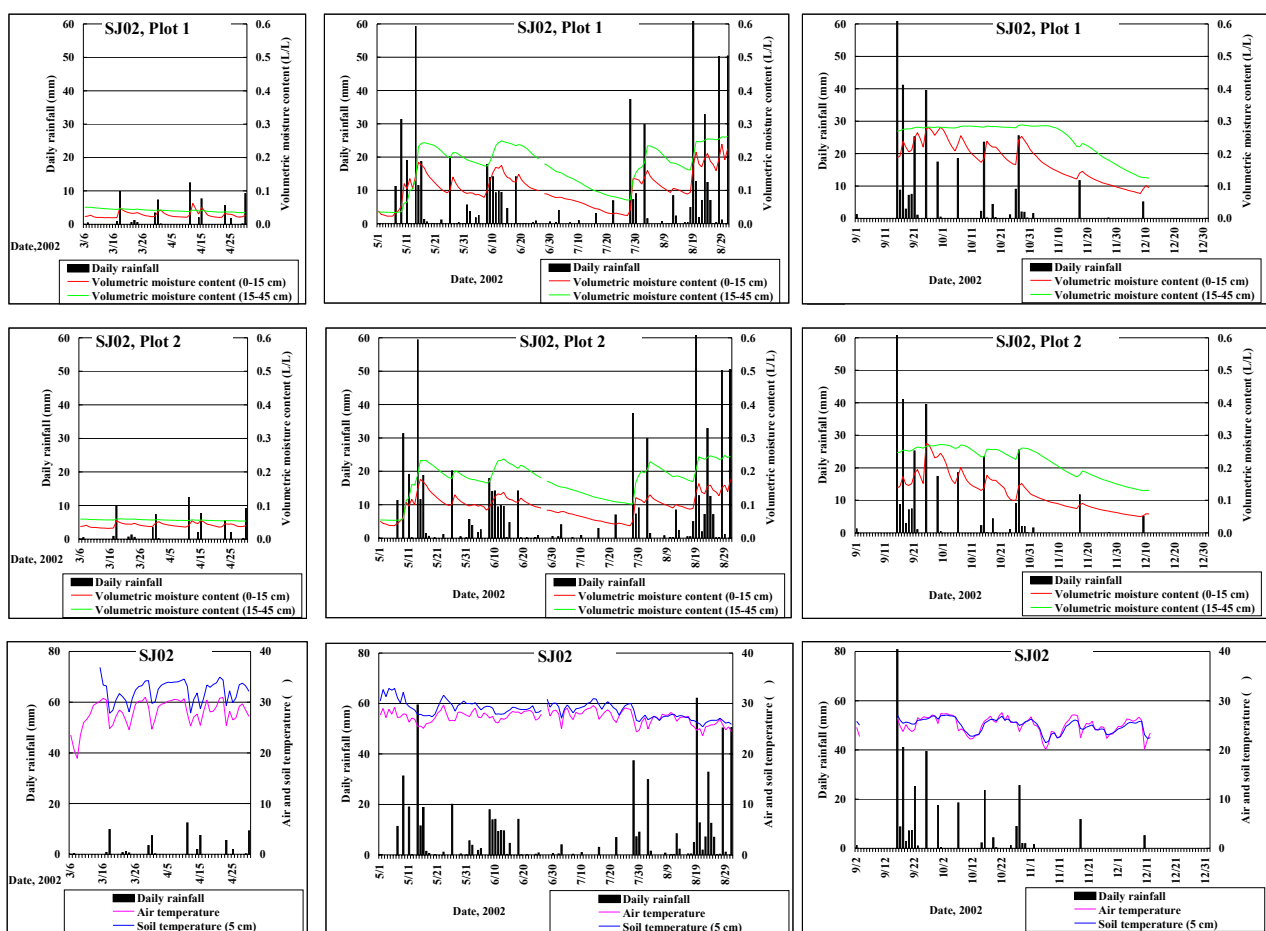


図 3 (1) . 調査期間中の気象・土壌環境概要 - - SJにおける降雨量、表層土および下層土の体積含水率、気温、地温の推移(いずれも日平均値) .

NR

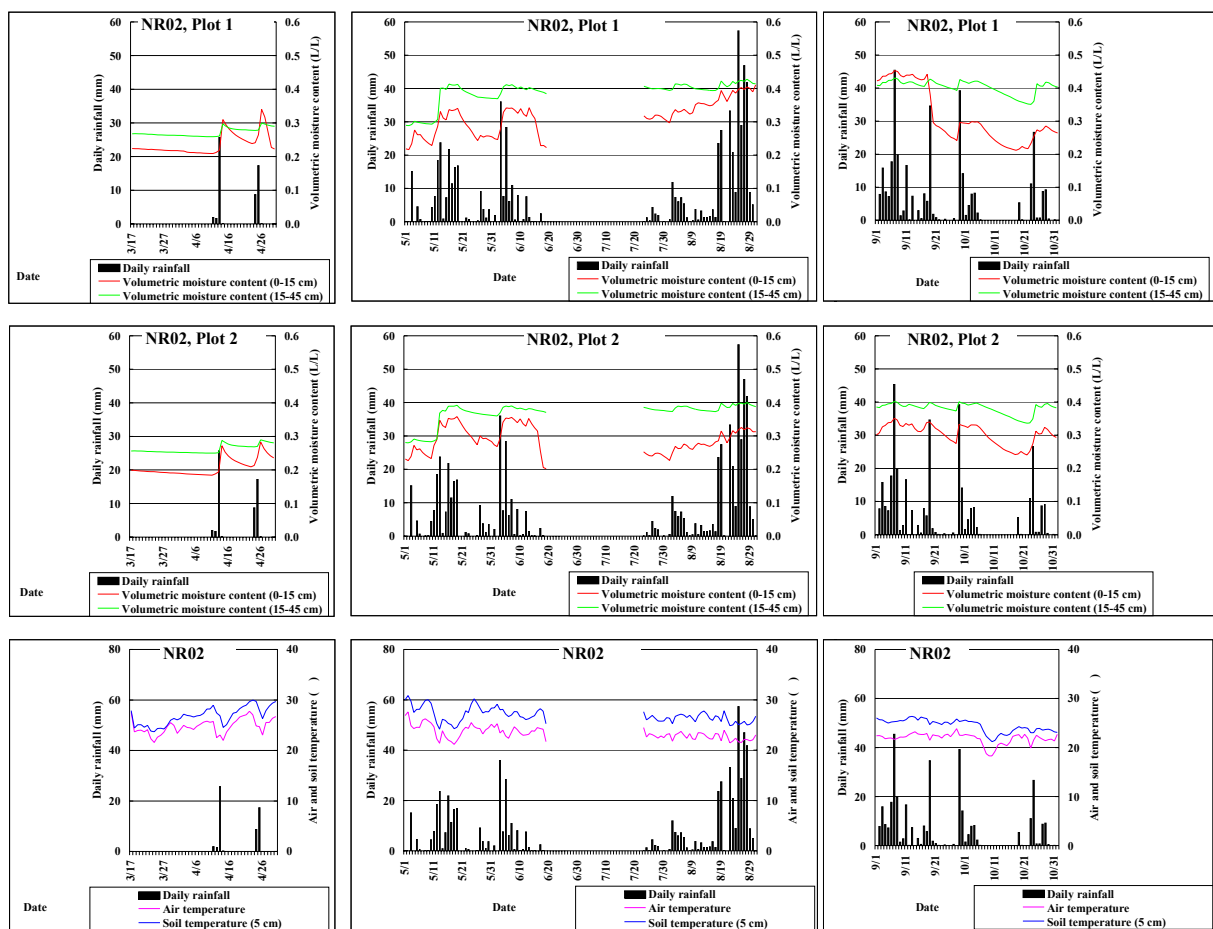


図3 (2. 調査期間中の気象・土壌環境概要 - - NRにおける降雨量、表層土および下層土の体積含水率、気温、地温の推移(いずれも日平均値) .

DP

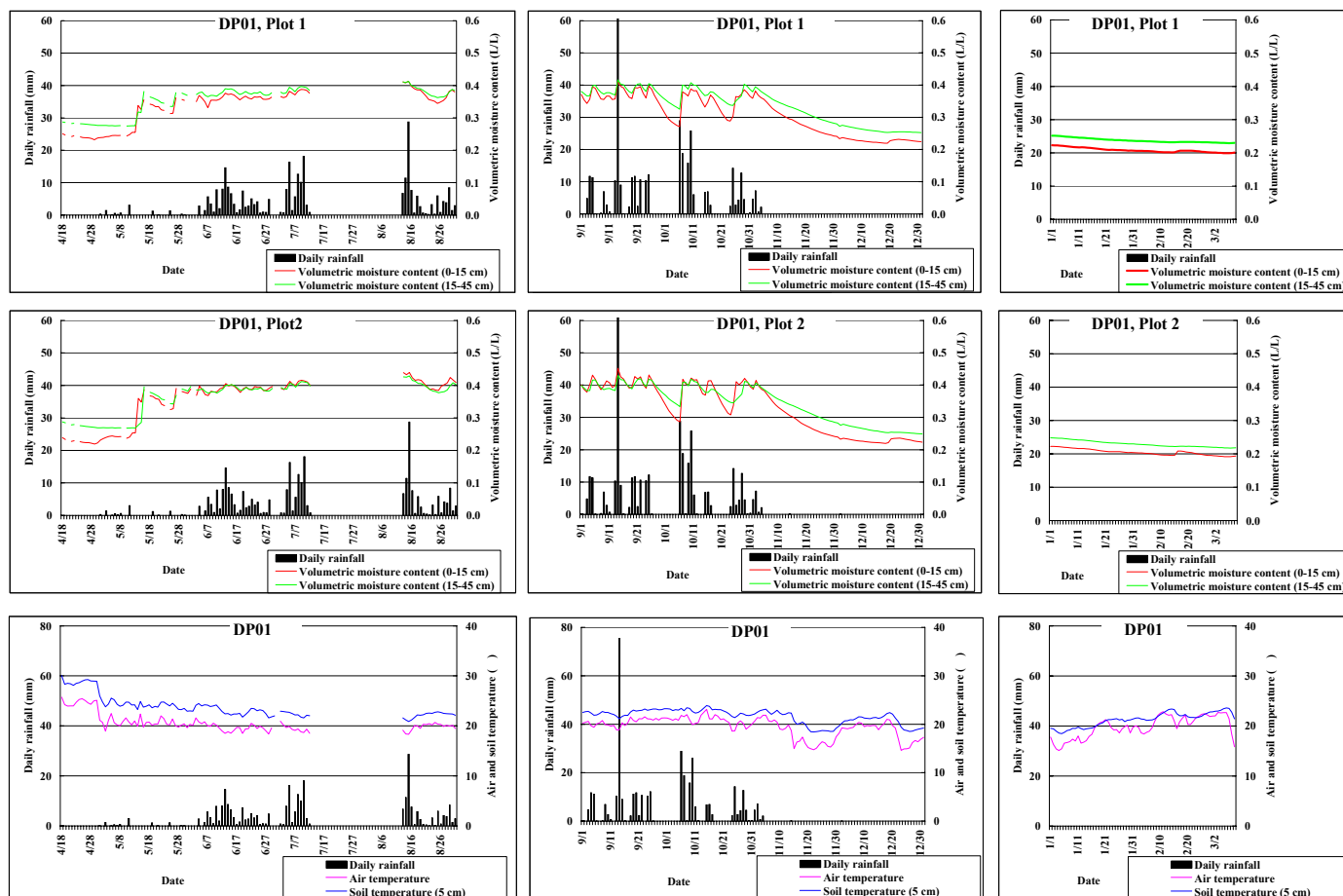


図 3 (3) . 調査期間中の気象・土壌環境概要 - - DPにおける降雨量、表層土および下層土の体積含水率、気温、地温の推移(いずれも日平均値) .

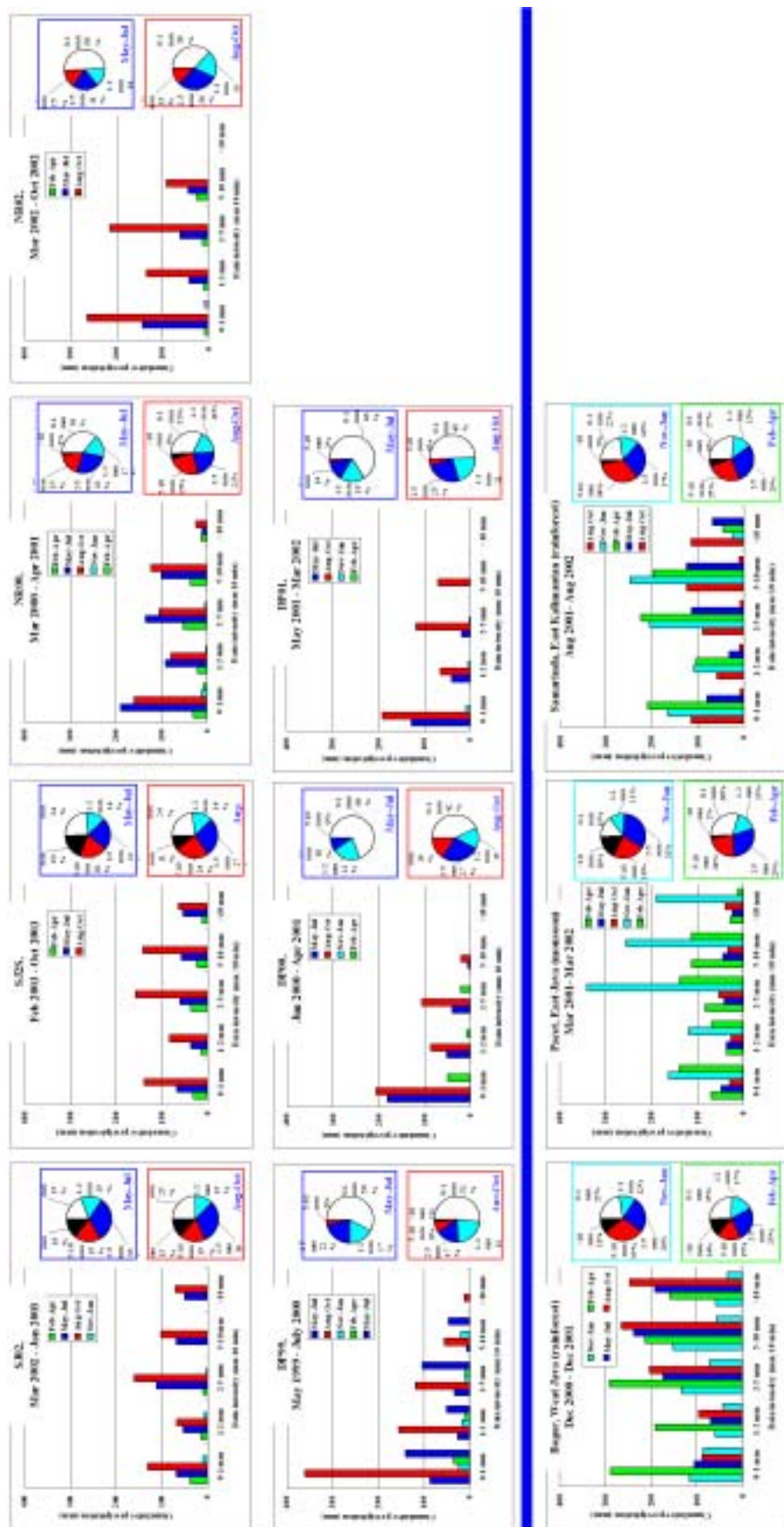


図4. SI, NR, DPおよびインドネシア国熱帯地域における季節別・降雨強度別降雨分布。

### 3.3 タイ国東北部低標高地 SJ のサトウキビ植栽砂質土壌における水分動態の検討

TDR 土壌水分計の測定値には、地温の日変動に起因する誤差が 2 mm/d 程度観測された。このことを考慮して、ここからは一日に 10 mm 以上のまとまった降雨について、図 5～7 に示した水分動態・収支の詳細に基づいて考察する。これらの図では、各降雨開始後 1 日間(降雨が連続する場合 2 日間)における表層土/下層土の体積含水率の推移(上段グラフ赤・紫実線)、降雨量(上段グラフ縦棒)、表面流去水発生量(上段グラフ茶点)、累積降雨量(下段グラフ水色実線；A)、降雨開始時からの土壌水分増加量の推移(下段グラフ赤実線；B)、累積表面流去水量(下段グラフ茶実線；C)、累積水収支(緑実線；A - B - C で、正の値は降雨後記録されない水をあらわし、植生葉面への滞留/蒸発、土壌表層への滞留/蒸発、下層土からの排水などが含まれる)をそれぞれプロットしている。全般的な傾向として、本実験の設定

プロット上部を区切り、表面流去水発生に際して斜面長の影響を最小とする で測定される表面流去水量は、降雨量や土壌水分獲得量、累積水収支などと比べてきわめて小さい。したがって、測定期間中表面流去水測定ゲージが動作不良に陥ることがあったが、この場合便宜上表面流去水発生量を 0 として水収支を算出した。

先述したように SJ における調査期間の概況は、雨季初期の降雨期に続き 6 月中旬から 7 月下旬にかけて少雨期が見られること(それに応じて土壌も乾燥する)、8 月中旬の強い雨を待って下層土がほぼ連続的に毛管飽和された状態となること(  $\geq 0.25$  )、雨季を通して降雨後数日で表層土は乾燥傾向にあることなどの点によって特徴づけられる(図 3a)。ここでは調査期間中 24 回の降雨イベントが 10 mm/日という条件に合致した。図 5 を用いて、これらの降雨イベントに際しての水の移動について、いくつかのパターンに分けて検討する。

- I) 降雨イベント 1、2、3、23：表層土の初期体積含水率が十分低く(  $< 0.2$  )、累積降雨量も小さいため、降雨時に表層土の体積含水率が若干上昇したのみで、時間が経過しても下層土まで水が浸透していない。また表面流去発生量も小さい。下段グラフの累積水収支は、降雨直後おそらく土壌表面への一時的滞留効果によって急激に、またその後しばらくしてから昼間の蒸発散として、ゆっくり増加する。「毛管不飽和・非排水型(降雨少)」
- II) 降雨イベント 4、5、8、10、11、12、24：初期含水率は低い(  $< 0.2$  )ものの、かなり強い降雨( $>5$  mm/10 分程度)があった例では、降雨の下層土への浸透 表層土体積含水率の漸減と下層土体積含水率の漸増 が観察された。この場合降雨中に一時的な累積水収支の急上昇/再低下が見られるが、これはおそらく土壌表面への一時的な水の滞留により計測されない水が発生したためであろう。そしてこの条件では相当量の表面流去が発生している。しかしながら下層土体積含水率が  $\geq 0.25$  に達しなければ、土壌水の 45 cm 以深への排水 累積水収支の顕著な増大として観察される は発生せず、降雨後しばらくしてからケース I) でみられたような、昼間の蒸発散によるゆるやかな累積水収支の増加が起こる。「毛管不飽和・非排水型(降雨大)」
- III) 降雨イベント 6、7、9、13、14、15、16：降雨開始直後あるいは降雨中に表層土・下層土ともに  $\geq 0.2 \sim 0.25$  に達し、さらに降雨が続いた場合、継続的かつ顕著な累積水収支の増大が観察される。これは土壌水の 45 cm 以深への排水であると考えられる。「毛管飽和・排水型」



IV) 降雨イベント 17、18、19、20、21(Plot 1)、22(Plot 1)：降雨中に顕著な水収支増大(ジャンプ)が観察され、その後の一時的な水収支減少　表面滞留水の浸透を示す　および継続的な水収支増大　排水を示す　がともに観察されない。サトウキビが身長を超えるほどに生長した雨季后期によく見られることから、葉表面などへの降雨の滞留・直接蒸発が示唆される。　「葉面遮断型」

I)の「毛管不飽和・非排水型(降雨弱)」は砂質土壤がきわめて乾燥している雨季初期に多い。一方 IV)の「葉面遮断型」はサトウキビが生長した雨季后期にしばしば見られる。土壌深層への明らかな排水が観察されるケースは、特に III)の条件「毛管飽和・排水型」で多い。このタイプの降雨イベントから判断される毛管飽和時の土壌体積含水率　は、プロット 1 で 0.24、プロット 2 で 0.23 程度である。これは 100 mL コアサンプラーを用いて作成した pF - 水分曲線より求めた下層土の重力水排除時(pF 1.8)の体積含水率 0.24 にほぼ等しい(図 2)。また SJ では表面流去水発生量に対して、上記分類による土壌体積含水率の状況の影響が明瞭ではない。強度の大きい降雨があれば、雨季を通して表面流去水が発生しているようである。

### 3 . 4　タイ国北部中山間地 NR の裸地管理土壌における水分動態の検討

先述したように NR では、5 月 10 日過ぎにすでに下層土で毛管飽和となり、以後下層土では毛管飽和の状態が継続したものと考えられる(  $\theta = 0.4$  )。一方表層土では、一日平均の値によれば毛管孔隙が水飽和されることはほとんどなく、良好な内部排水が確保されていたものと見られる(図 3b)。NR では、調査期間中 20 回の降雨イベントが 10 mm/日の条件に合致した。これらの降雨イベントについて、以下降雨由来の水の移動をいくつかのパターンに分けて検討する(図 6)。

I) 降雨イベント 1、2、3、4：初期体積含水率が十分低いため(  $\theta \leq 0.3$  )、降雨時に表層土の体積含水率が若干上昇したのみで、時間が経過しても下層土までそれほど水が浸透していない。また表面流去発生量も小さい。下段グラフにおいて降雨中の累積水収支急上昇/再低下の見られることがあるが、後述 II)のような降雨の大きいケースでもこのような動態が一般的でないことから、これは土壌表面への一次的滞留効果というよりは層位内(0 ~ 15 cm 深)水分分布の不均一性を捉えきれない TDR プローブの特性による誤差だと思われる。累積水収支は、降雨後しばらくしてから昼間の蒸発としてゆっくり増加するが、これも植生に覆われた SJ ほど急速ではない。　「毛管不飽和・非排水型」

II) 降雨イベント 5、6、7、8、19、20：降雨開始直後あるいは降雨中に下層土が毛管飽和(  $\theta = 0.4$  )に達し、さらに降雨が続いた場合、継続的かつ顕著な累積水収支の増大が観察される。これは土壌水の 45 cm 以深への排水であると考えられる。また SJ でたびたび観察された降雨中の土壌表面への一次的な滞留　累積水収支の急上昇/再低下　は、NR ではあまり観察されない。降雨の際、表層土とほとんど同時に下層土の体積含水率も上昇すること、また表層土の体積含水率は降雨終了後速やかに減少することを併せて考えれば、この時期の NR における土壌の透水性ないしは断面の排水能は十分大きいものと思われる。特に表層土の良好な透水性を反映して、このタイプ

の降雨イベントでは表面流去水量の発生は小さい。 「下層土毛管飽和・排水型」

III) 降雨イベント 9、10、11、12、13、14、15、16、17、18：雨季中期以降の降雨の際観察されるパターンで、下層土のみならず表層土においても、降雨開始直後にほぼ毛管飽和に近い状態に達するケースである( $\geq 0.4$ )。そのため行き場を失った水に起因する表面流去水発生量が大きく、また累積水収支の増大で表される降雨中・降雨後の下層土からの排水も大きい。降雨イベント 11 を除けば、プロット 2 と比べてプロット 1 の方で表層土の体積含水率が高く、おそらくこれを反映してプロット 1 において表面流去水発生量がより大きい。中でも降雨イベント 14、16 の際プロット 1 で観察された表面流去発生量はきわめて大きく、破局的な土壌侵食を伴った可能性もある。

「全層毛管飽和・排水/表面流去水発生型」

このように NR では、降雨時の体積含水率によって水動態が規定されるが、これは雨季全体を通しての土壌水分の全般的な推移傾向にほぼ対応する。すなわち、

第 1 期：5 月初旬までの雨季初期には土壌の降雨収容能力が大きく、下層土からの排水、表面流去水ともにあまり発生しない。

第 2 期：5 月 10 日以降本格的な雨季到来とともに、下層土がほぼ毛管飽和された状態が続くようになる。降雨の表層土への浸透が保証されており、表面流去水はあまり発生しない。一方降雨強度によっては、下層土からの排水は大きい。

第 3 期：計測機器の不都合のため詳細は不明であるが、8 月後半以降雨季後期には、降雨に際して表層土もしばしば毛管飽和に達する。このときの土壌体積含水率は、プロット 1 で  $\approx 0.41$ 、プロット 2 で  $\approx 0.39$  程度である。これは 100 mL コアサンプラーを用いて作成した pF - 水分曲線より求めた下層土の重力水排除時(pF 1.8)の体積含水率 0.44 にほぼ等しい(図 2)。そして表層土までも毛管飽和される程度に土壌水分含量が上がった場合、排水とともに表面流去水の発生も大きくなる。

### 3.5 タイ国北部高標高山間地 DP の陸稻植栽焼畑耕地土壌における水分動態の検討

DP では、データ欠損期はあるものの、6 月初旬から 10 月下旬まで表層土・下層土ともに、ほぼ毛管が水飽和された状況( $\geq 0.4$ )で推移した(図 3c)。調査期間中 DP では、19 回の降雨イベントが 10 mm/日の条件に合致した。ここでは雨季を通しての体積含水率の推移に特徴が見られないことから、水の移動に関して全降雨を通して見られた現象を検討する(図 7)。

- I) ここまで排水などの指標としてきた累積水収支については、DP では特に強い降雨時に、急激な減少を示すことがある。降雨イベント 9、11、12(プロット 2)、13、14(プロット 2)、15、18(プロット 2)。下段グラフより、これらの降雨ではしばしば土壌体積含水率の増加が降雨量を超えていることが読みとれる。同時に実験プロットで表面流去水が発生していることから、おそらく急峻な斜面上部より発生した表面流去水が、プロット上部を区切ったブリキ板の下端よりプロットに流入し、このことが特にプロット下層土の体積含水率の過大評価につながったことが考えられる。
- II) 下層土における毛管飽和時の土壌体積含水率は、双方のプロットにおいて  $\approx 0.4$  程度である。これは 100 mL コアサンプラーを用いて作成した pF - 水分曲線より求めた下

層土の重力水排除時(pF 1.8)の体積含水率 0.4 にほぼ等しい(図 2)。

III) 降雨中から降雨後における累積水収支の緩やかな増大は、DP でも一般的に見られる。

降雨の土壌への浸透/下層土からの排水、透水性の良好なことがうかがわれる。SJ、NR における例に従えば、いずれの降雨イベントも「毛管飽和・排水型」あるいは「全層毛管飽和・排水/表面流去水発生型」に分類されるといえる。

IV) ほとんどの降雨に際して、プロット 1 と比べてプロット 2 において、表層土の体積含水率およびその降雨時の増加量が大きい。このことを反映して、後者において表面流去水の発生量も大きい。

V) また特にプロット 2 において顕著であるが、8 月中旬の降雨イベント 7 以降、強い降雨に際して表層土の体積含水率が急激かつ極端に大きくなるケースがしばしば見られる。このとき多量の表面流去水が発生する。

IV) SJ で見られた植生による降雨の遮断効果は、DP ではほとんど見られなかった。植生高が数 m に達するサトウキビと異なり、植生高・被覆度ともに小さな陸稲では、水収支に影響するほどの降雨の遮断効果はなかったものと考えられる。ただし土壌侵食発生に際し重視されている雨滴衝突エネルギーについては、ここでは検討できない。

このように DP では、おそらく急峻な地形に起因するであろう表層土の体積含水率の不均一性が、実際の表面流去発生量を大きく規定していた。プロット 2 における表面流去水発生量 > プロット 1 における表面流去水発生量。一方このような地形要因が、斜面上方からの流去水を遮断できなかったことを通して、本実験装置における水収支測定の誤差要因として働いたともいえる。また雨季後期に、強い降雨時に表面流去が頻発した。しかしながら、調査地点の中ではきわめて斜度が大きいこと、常に土壌が毛管飽和された状態であったことなどを勘案すれば、DP 土壌は透水性に恵まれた表面流去の発生しにくい土壌であったともいえよう。

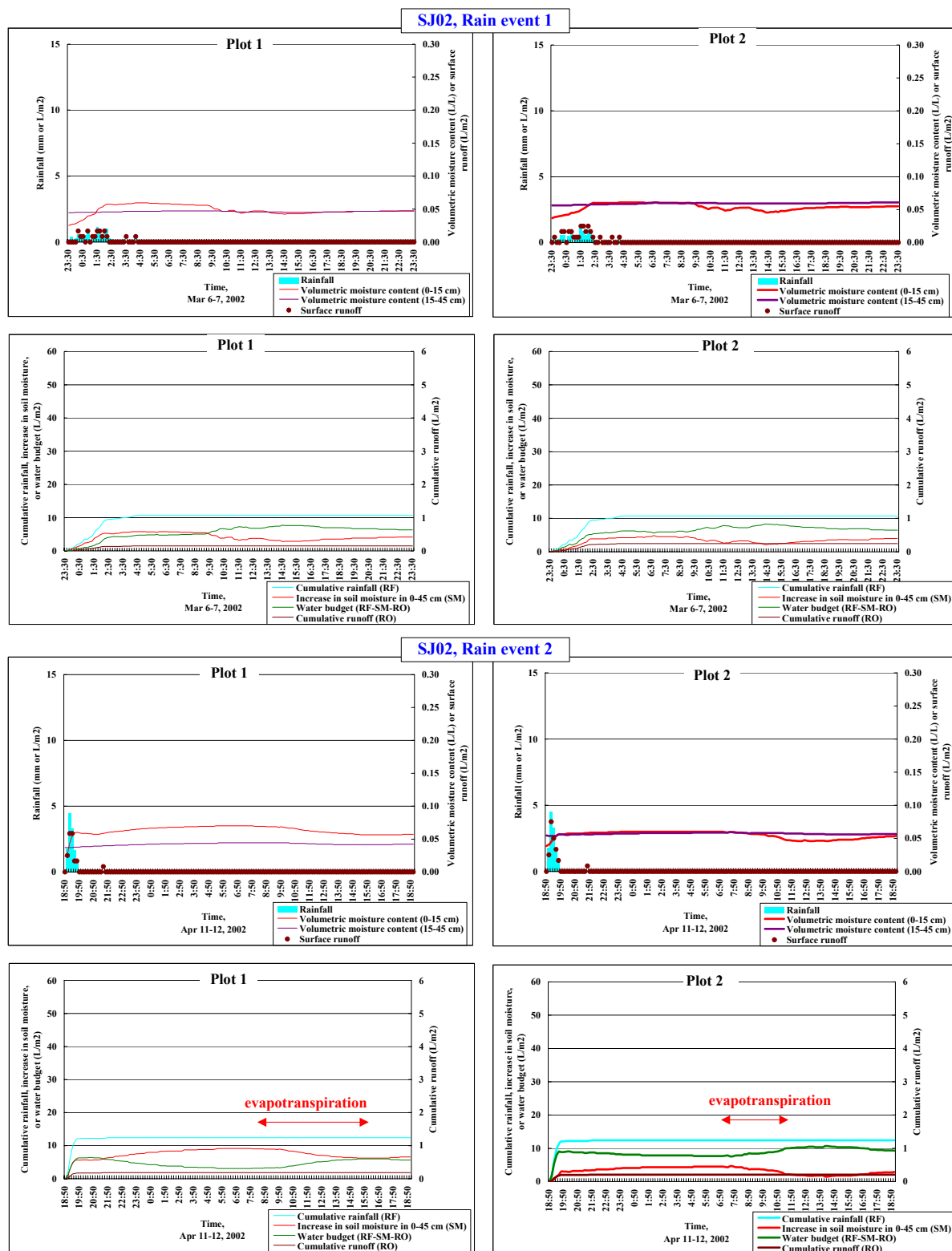


図5(1) . SJにおける各降雨時10分間隔の土壌体積含水率(上段グラフ赤・紫実線)、降雨量(上段グラフ水色縦棒)、表面流去水発生量(上段グラフ茶点)、累積降雨量(下段グラフ水色実線 : A、降雨開始時からの土壌水分増加量(下段グラフ赤実線 : B)、累積表面流去水量(下段グラフ茶実線 : C)、累積水収支(緑実線 :  $A - B - C$ )の推移 .

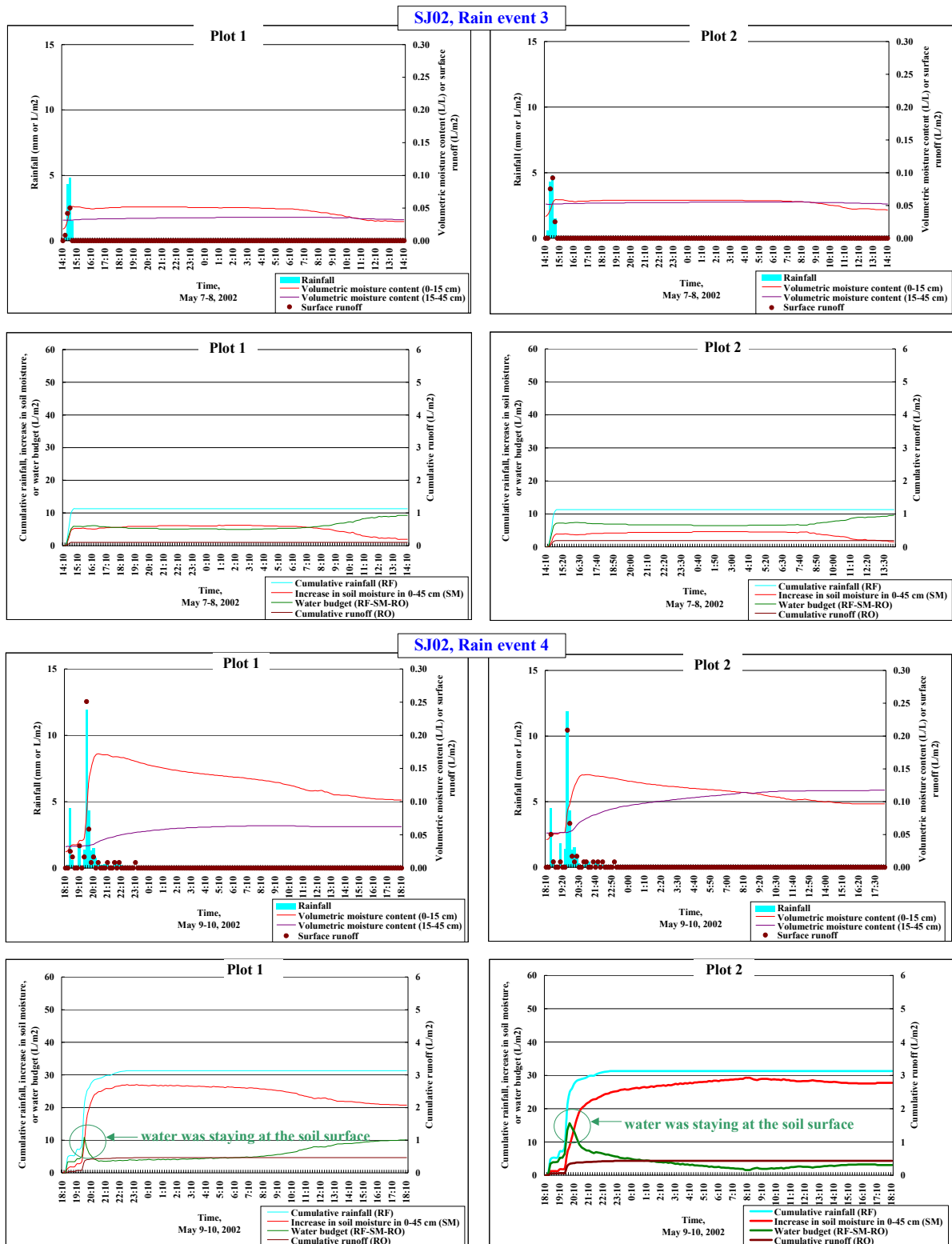


図5(2)．SJにおける各降雨時10分間隔の土壌体積含水率(上段グラフ赤・紫実線)、降雨量(上段グラフ水色縦棒)、表面流去水発生量(上段グラフ茶点)、累積降雨量(下段グラフ水色実線：A)、降雨開始時からの土壌水分増加量(下段グラフ赤実線：B)、累積表面流去水量(下段グラフ茶実線：C)、累積水収支(緑実線：A - B - C)の推移．

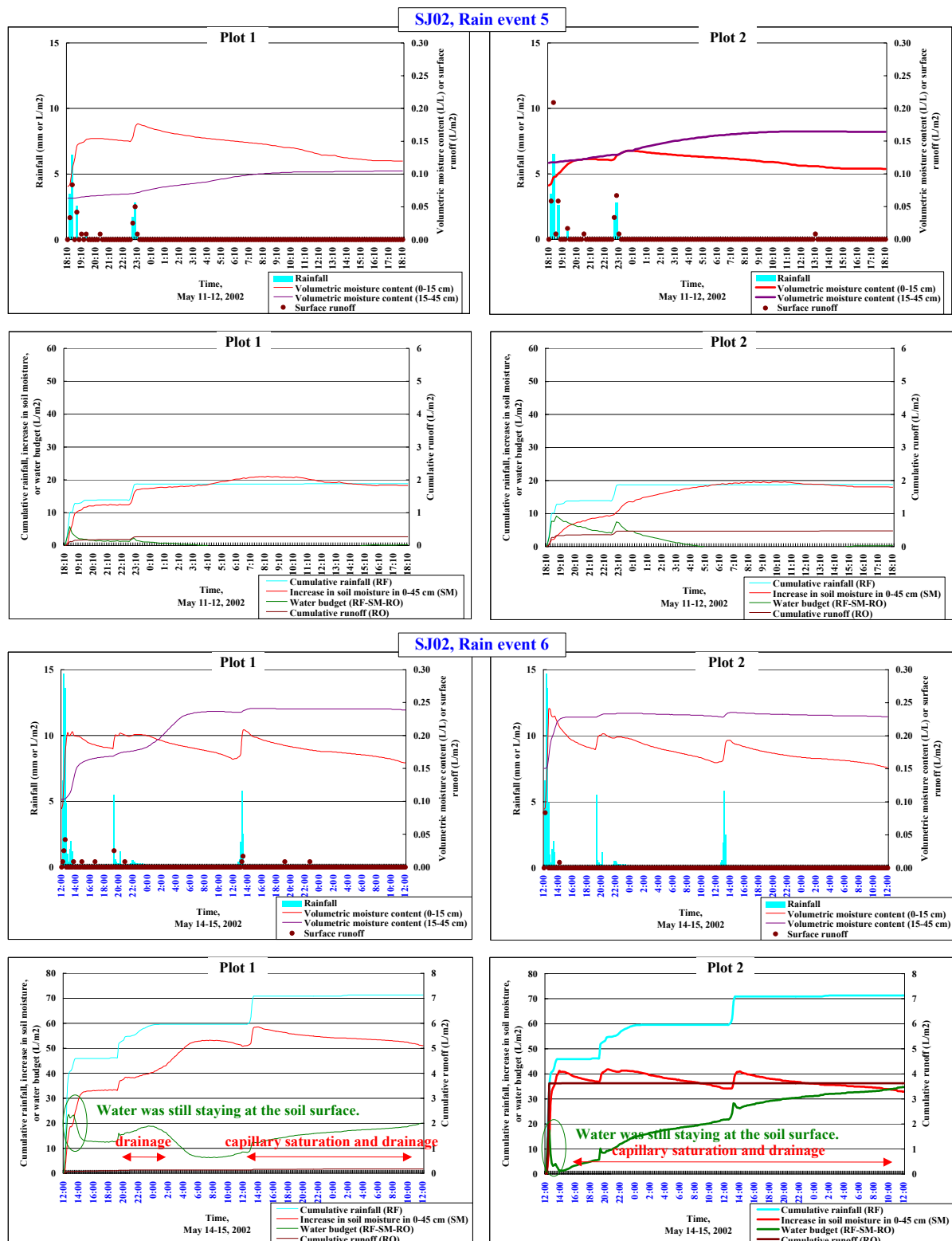


図5(3) . SJにおける各降雨時10分間隔の土壌体積含水率(上段グラフ赤・紫実線)、降雨量(上段グラフ水色縦棒)、表面流去水発生量(上段グラフ茶点)、累積降雨量(下段グラフ水色実線 : A、降雨開始時からの土壌水分増加量(下段グラフ赤実線 : B)、累積表面流去水量(下段グラフ茶実線 : C)、累積水収支(緑実線 : A - B - C)の推移 .

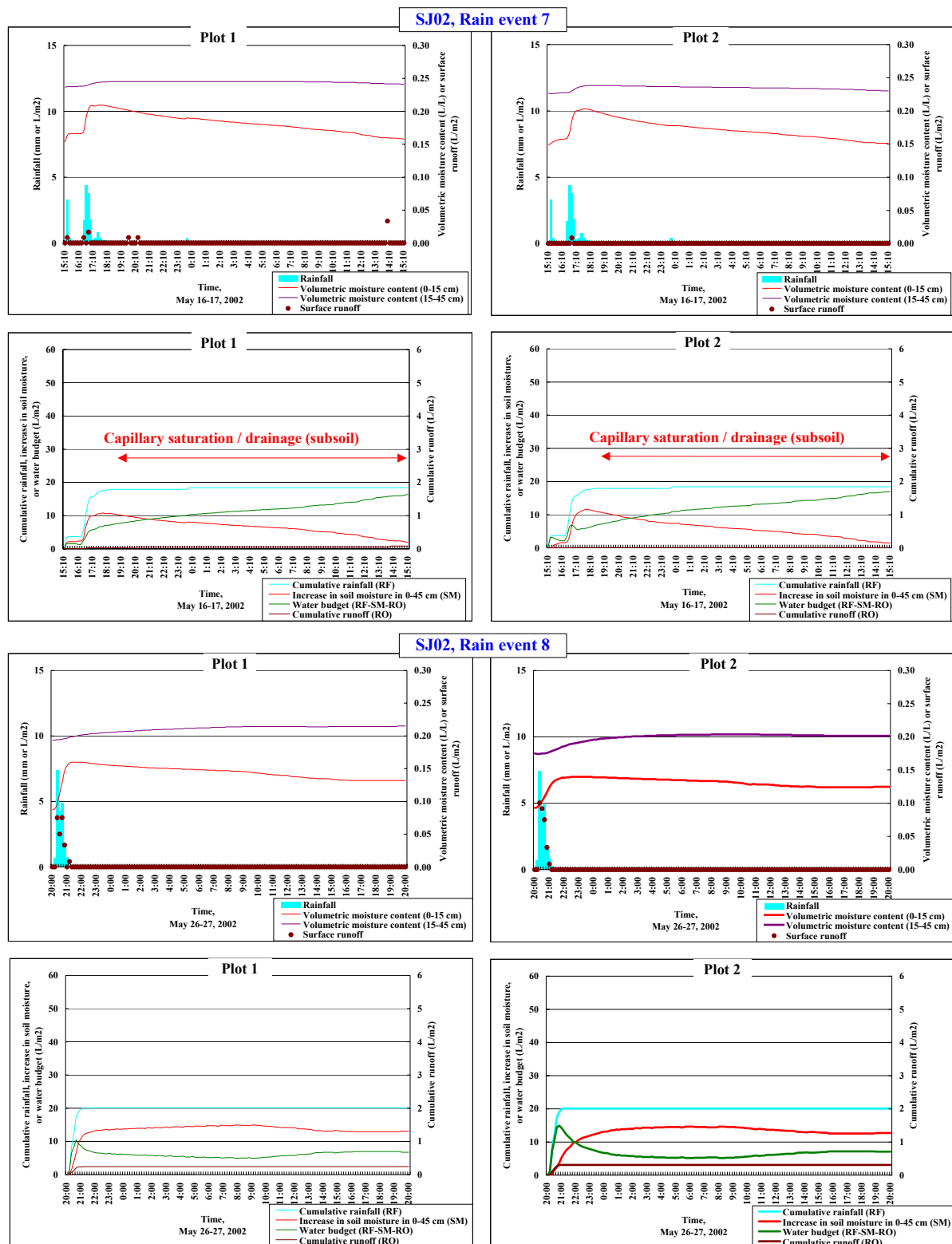


図5(4)．SJにおける各降雨時10分間隔の土壌体積含水率(上段グラフ赤・紫実線)、降雨量(上段グラフ水色縦棒)、表面流去水発生量(上段グラフ茶点)、累積降雨量(下段グラフ水色実線：A)、降雨開始時からの土壌水分増加量(下段グラフ赤実線：B)、累積表面流去水量(下段グラフ茶実線：C)、累積水収支(緑実線：A - B - C)の推移．

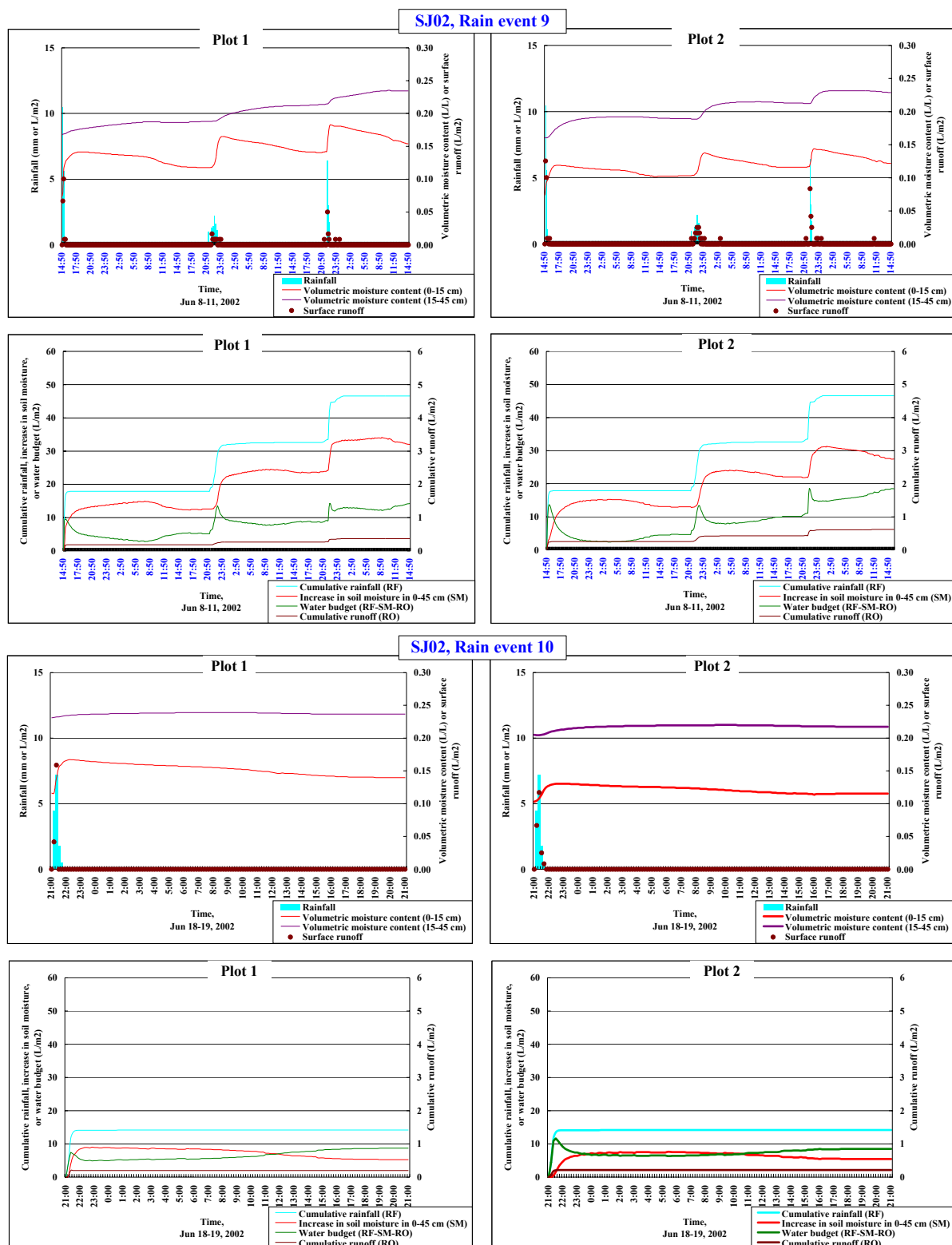
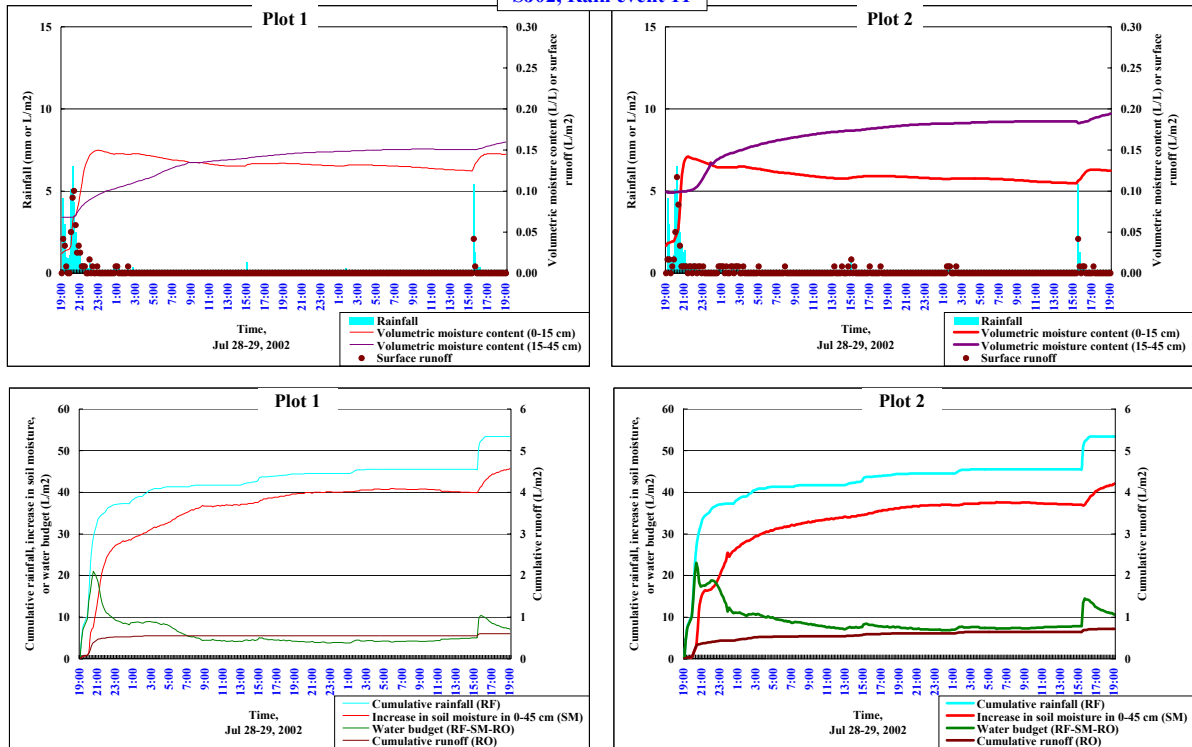


図5(5)．SJにおける各降雨時10分間隔の土壌体積含水率(上段グラフ赤・紫実線)、降雨量(上段グラフ水色縦棒)、表面流去水発生量(上段グラフ茶点)、累積降雨量(下段グラフ水色実線：A)、降雨開始時から土壌水分増加量(下段グラフ赤実線：B)、累積表面流去水量(下段グラフ茶実線：C)、累積水収支(緑実線：A - B - C)の推移．



### SJ02, Rain event 11



### SJ02, Rain event 12

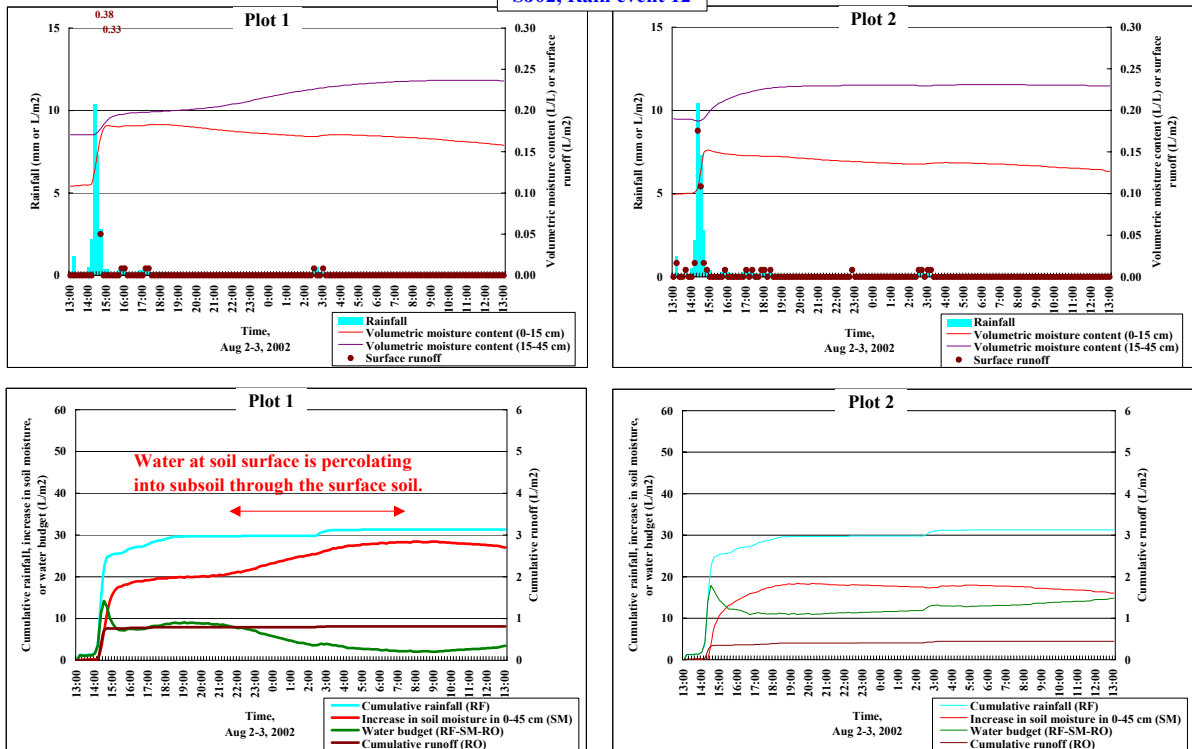
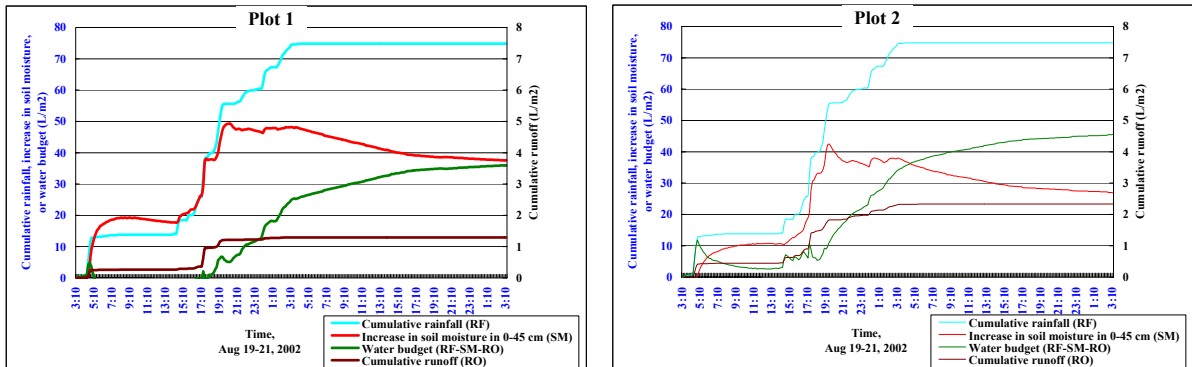
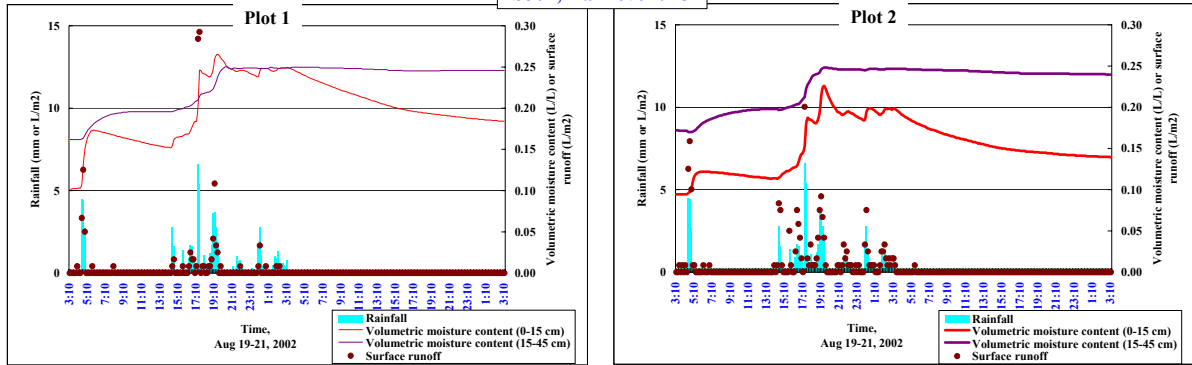


図5(6) . SJにおける各降雨時10分間隔の土壌体積含水率(上段グラフ赤・紫実線)、降雨量(上段グラフ水色縦棒)、表面流去水発生量(上段グラフ茶点)、累積降雨量(下段グラフ水色実線 : A)、降雨開始時からの土壌水分増加量(下段グラフ赤実線 : B)、累積表面流去水量(下段グラフ茶実線 : C)、累積水収支(緑実線 : A - B - C)の推移 .

SJ02, Rain event 13



SJ02, Rain event 14

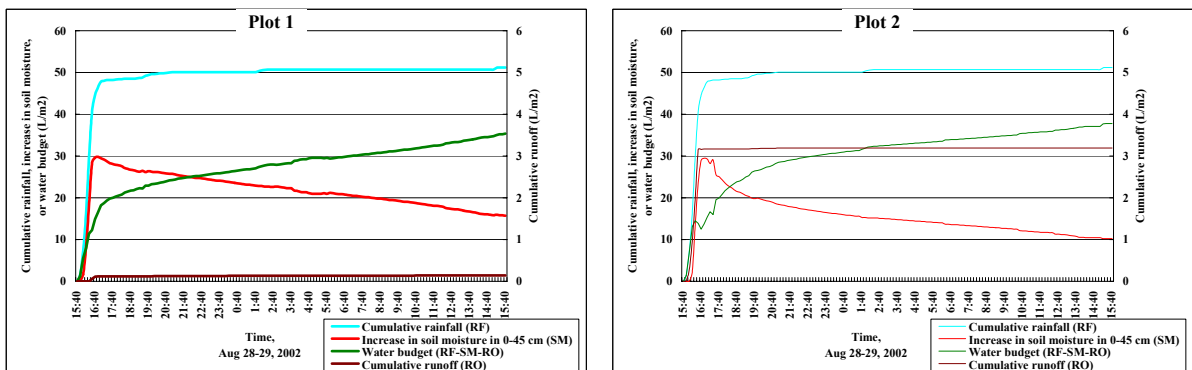
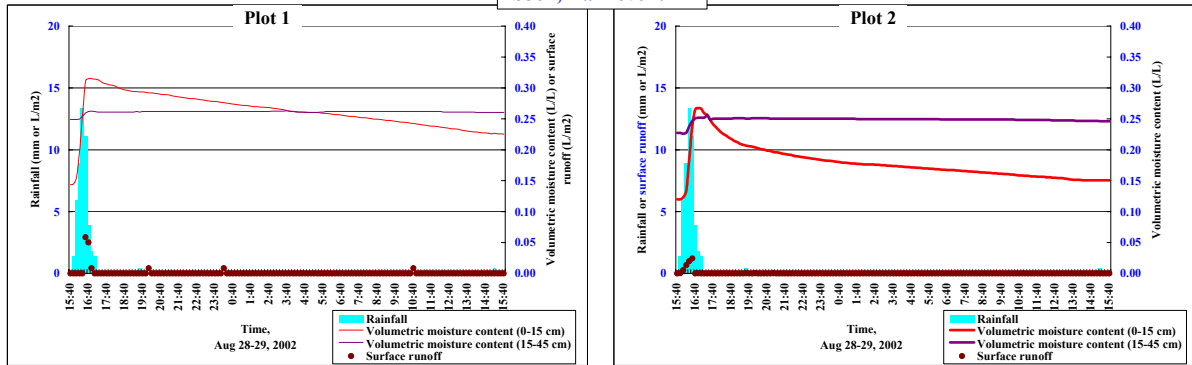


図5(7) . SJにおける各降雨時10分間隔の土壌体積含水率(上段グラフ赤・紫実線)、降雨量(上段グラフ水色縦棒)、表面流去水発生量(上段グラフ茶点)、累積降雨量(下段グラフ水色実線 : A)、降雨開始時からの土壌水分増加量(下段グラフ赤実線 : B)、累積表面流去水量(下段グラフ茶実線 : C)、累積水収支(緑実線 : A - B - C)の推移 .

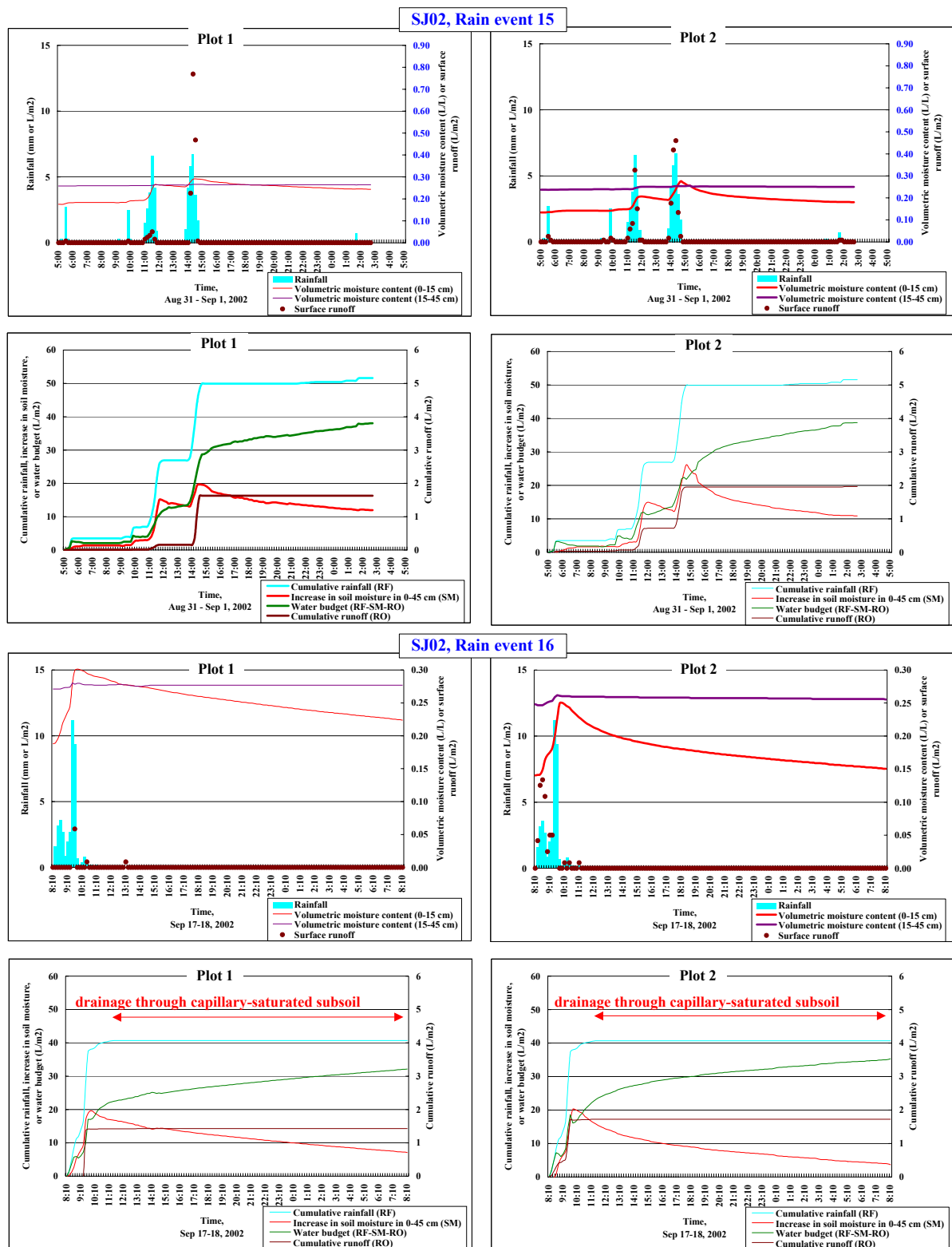
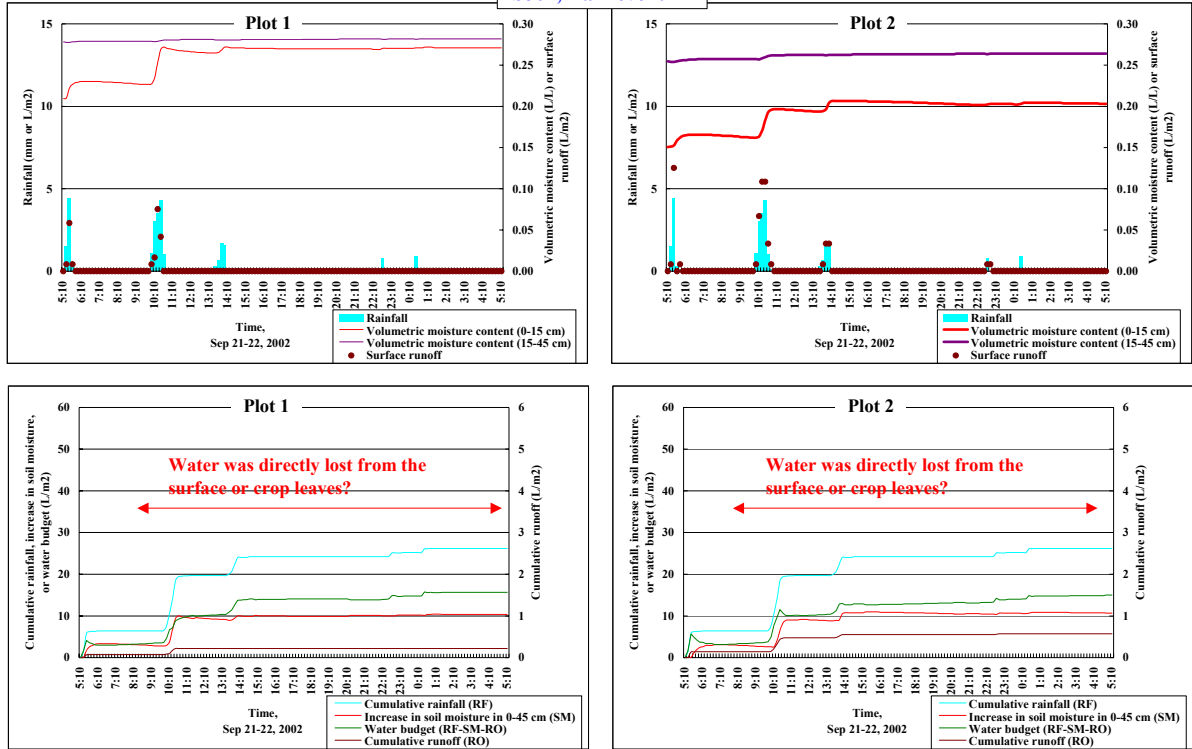


図5(8)．SJにおける各降雨時10分間隔の土壌体積含水率(上段グラフ赤・紫実線)、降雨量(上段グラフ水色縦棒)、表面流去水発生量(上段グラフ茶点)、累積降雨量(下段グラフ水色実線：A)、降雨開始時からの土壌水分増加量(下段グラフ赤実線：B)、累積表面流去水量(下段グラフ茶実線：C)、累積水収支(緑実線：A - B - C)の推移．

SJ02, Rain event 17



SJ02, Rain event 18

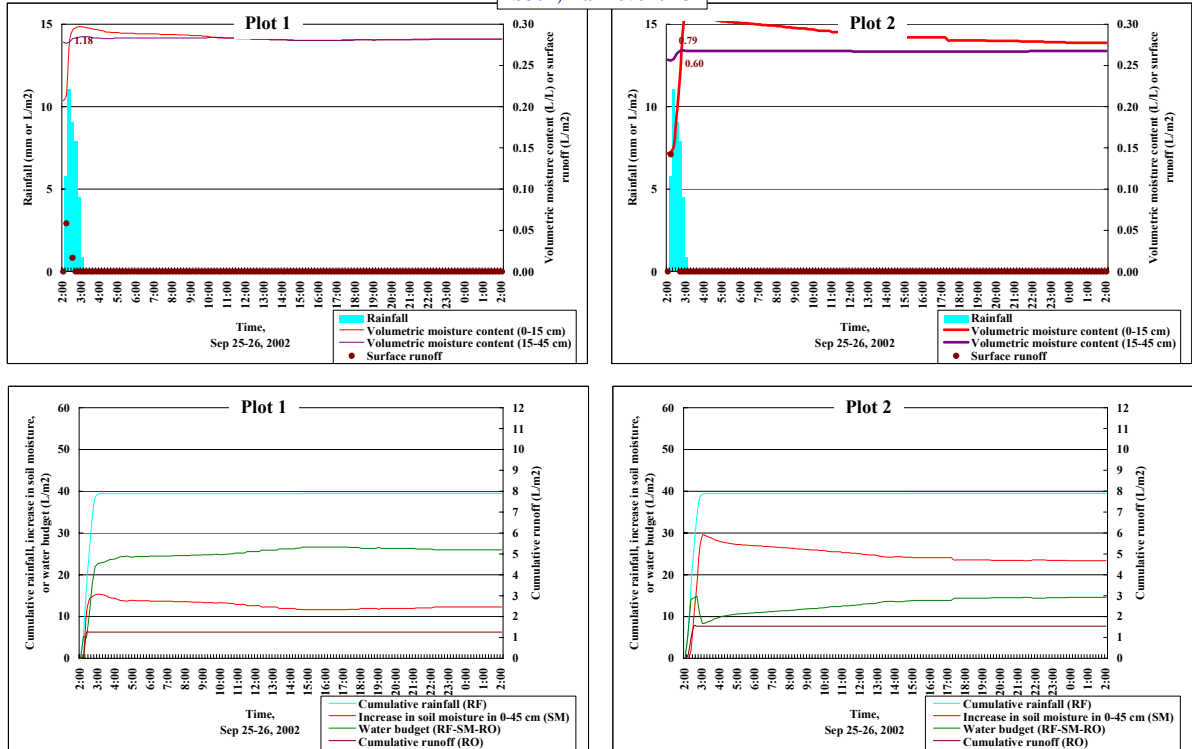
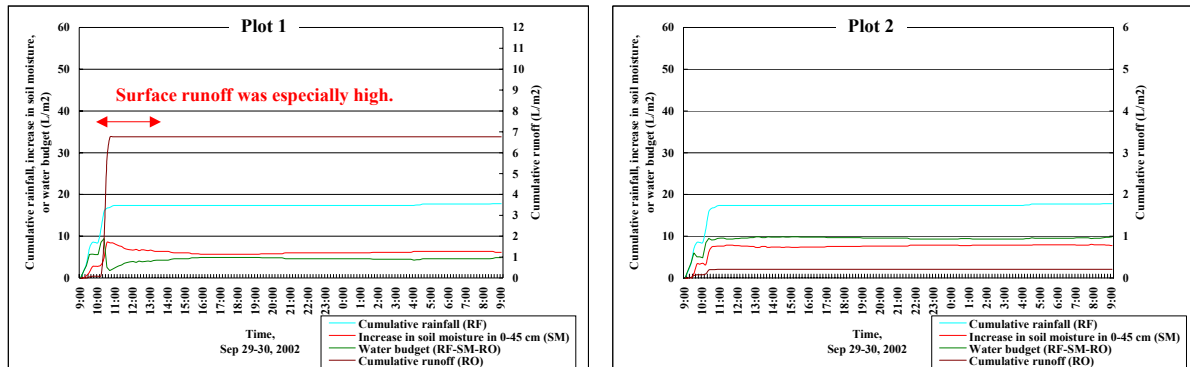
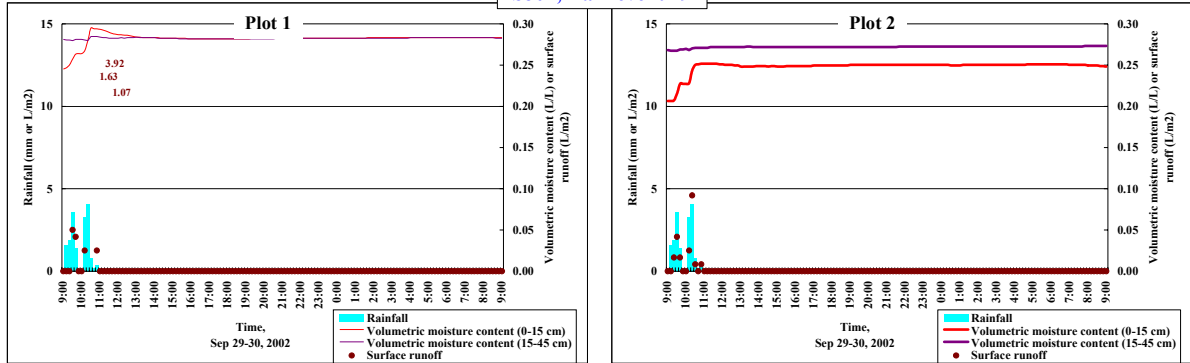


図5(9) . SJにおける各降雨時10分間隔の土壌体積含水率(上段グラフ赤・紫実線)、降雨量(上段グラフ水色縦棒)、表面流去水発生量(上段グラフ茶点)、累積降雨量(下段グラフ水色実線 : A)、降雨開始時からの土壌水分増加量(下段グラフ赤実線 : B)、累積表面流去水量(下段グラフ茶実線 : C)、累積水収支(緑実線 : A - B - C)の推移 .

SJ02, Rain event 19



SJ02, Rain event 20

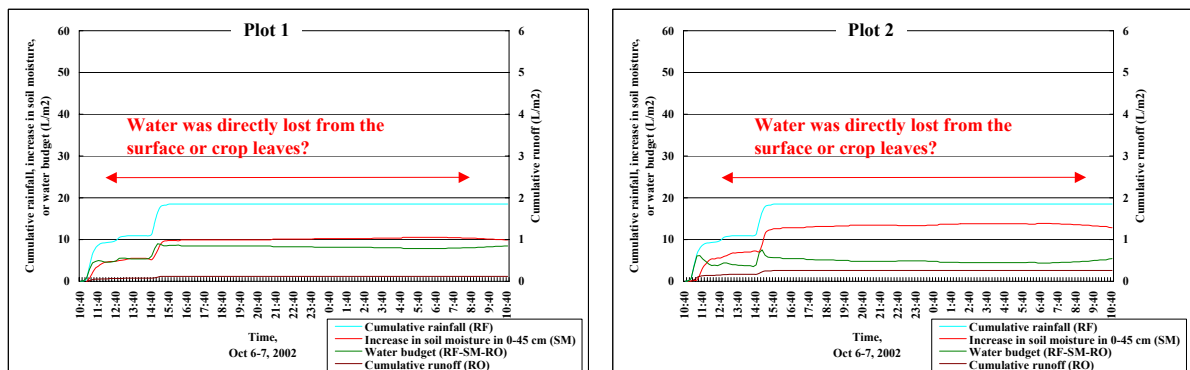
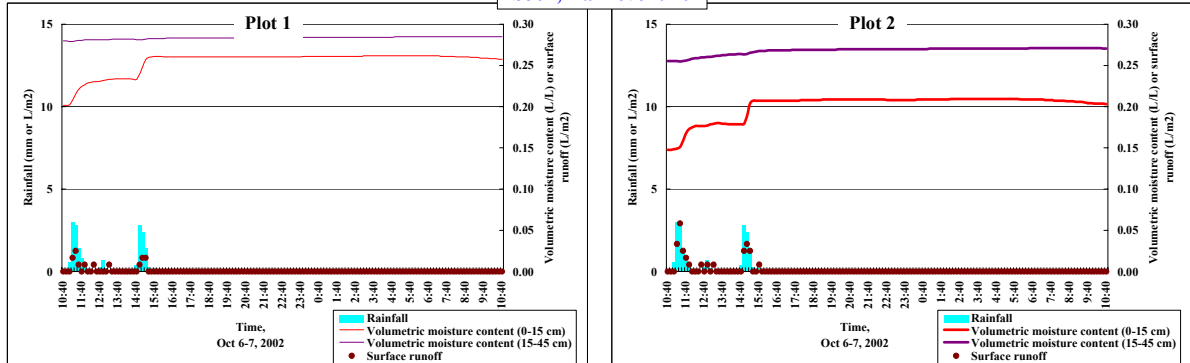
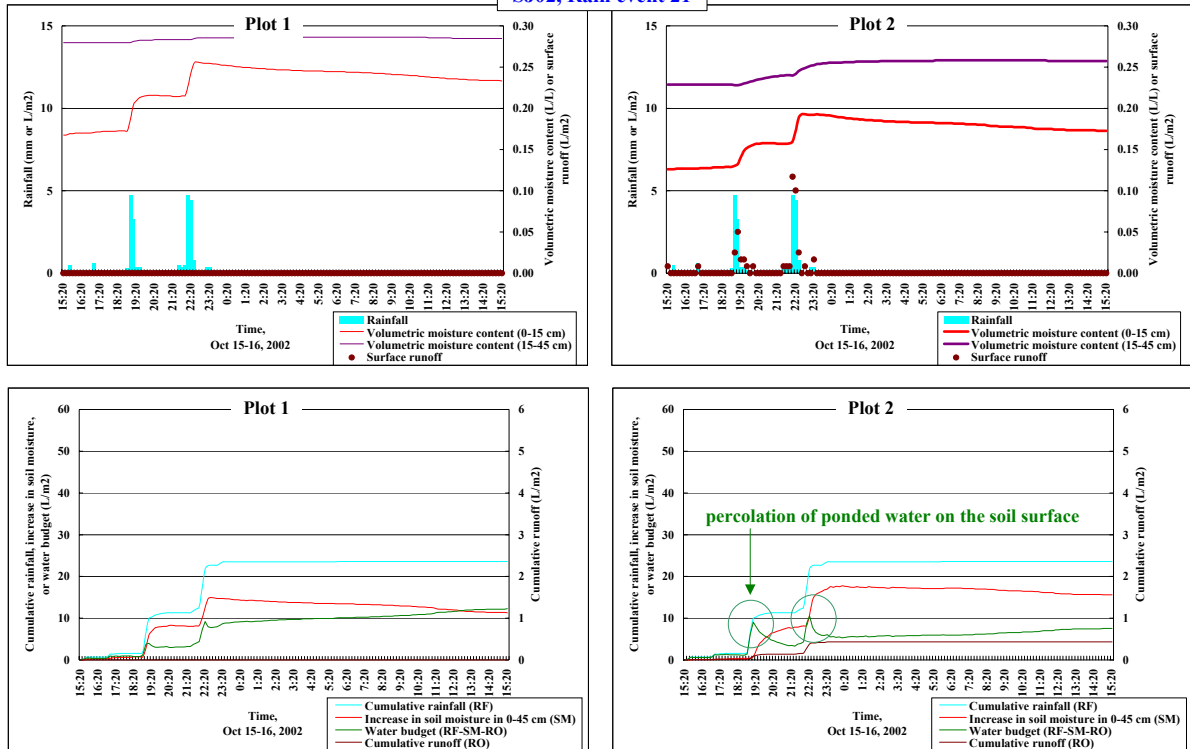


図5(10) . SJにおける各降雨時10分間隔の土壌体積含水率(上段グラフ赤・紫実線)、降雨量(上段グラフ水色縦棒)、表面流去水発生量(上段グラフ茶点)、累積降雨量(下段グラフ水色実線：A)、降雨開始時からの土壌水分増加量(下段グラフ赤実線：B)、累積表面流去水量(下段グラフ茶実線：C)、累積水収支(緑実線：A - B - C)の推移 .

# SJ02, Rain event 21



# SJ02, Rain event 22

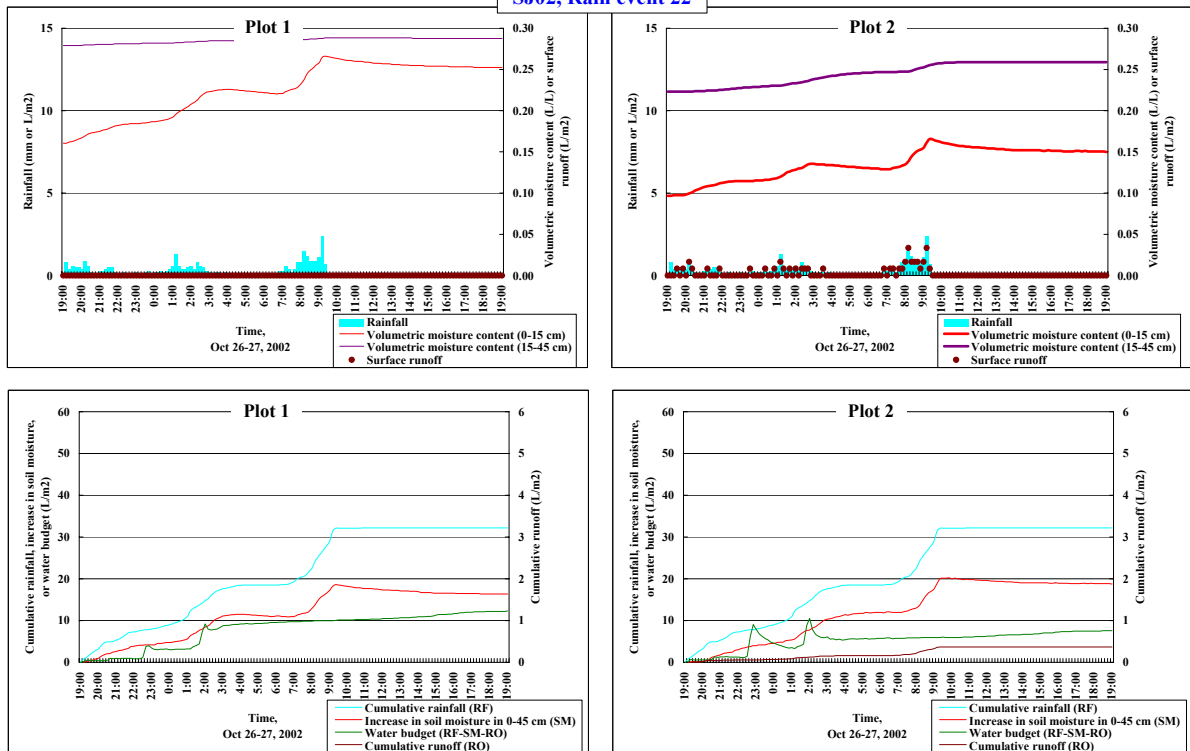


図5(11) . SJにおける各降雨時10分間隔の土壌体積含水率(上段グラフ赤・紫実線)、降雨量(上段グラフ水色縦棒)、表面流去水発生量(上段グラフ茶点)、累積降雨量(下段グラフ水色実線：A)、降雨開始時からの土壌水分増加量(下段グラフ赤実線：B)、累積表面流去水量(下段グラフ茶実線：C)、累積水収支(緑実線：A - B - C)の推移 .

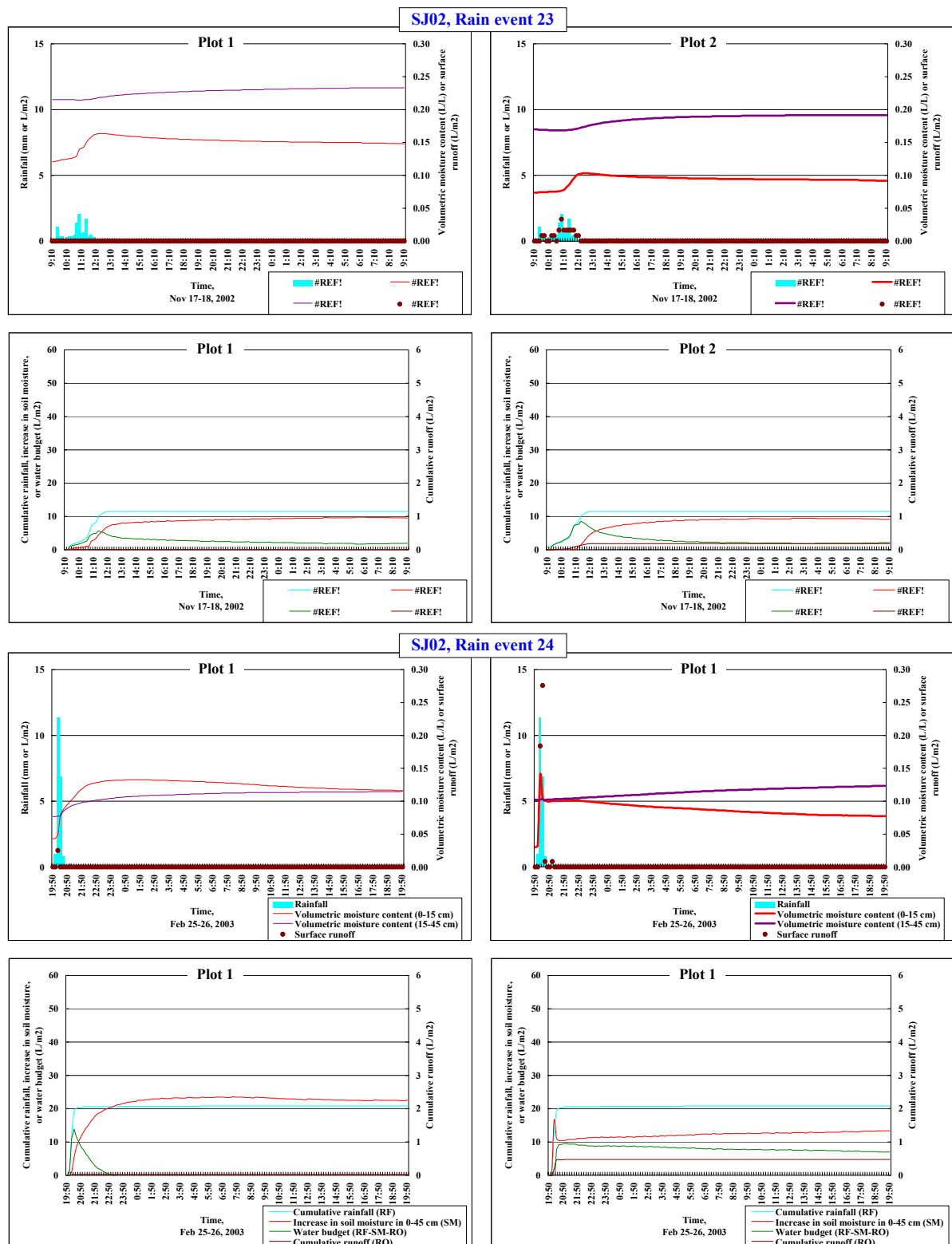


図5(12) . SJにおける各降雨時10分間隔の土壌体積含水率(上段グラフ赤・紫実線)、降雨量(上段グラフ水色縦棒)、表面流去水発生量(上段グラフ茶点)、累積降雨量(下段グラフ水色実線：A、降雨開始時からの土壌水分増加量(下段グラフ赤実線：B)、累積表面流去水量(下段グラフ茶実線：C)、累積水収支(緑実線：A - B - C)の推移。

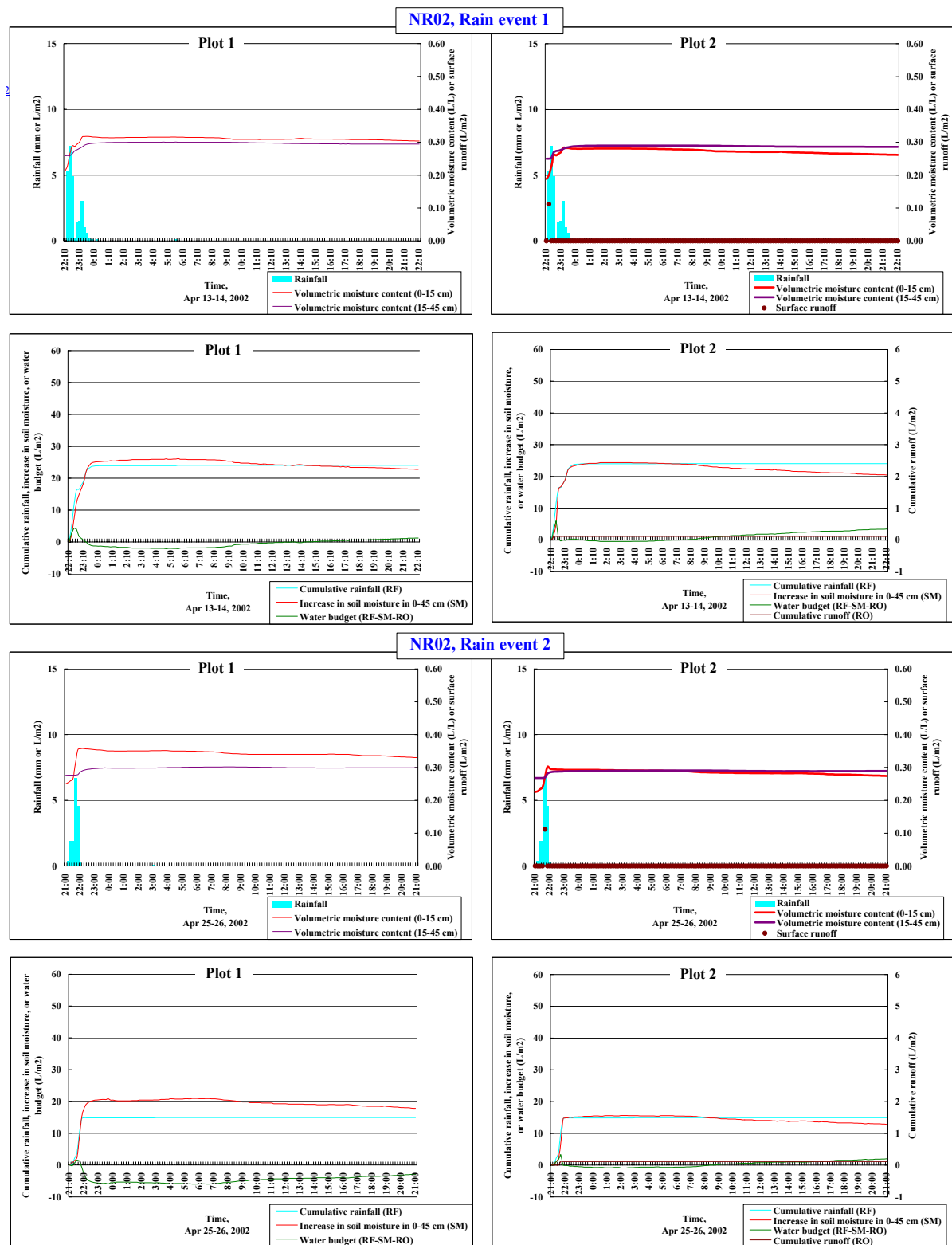
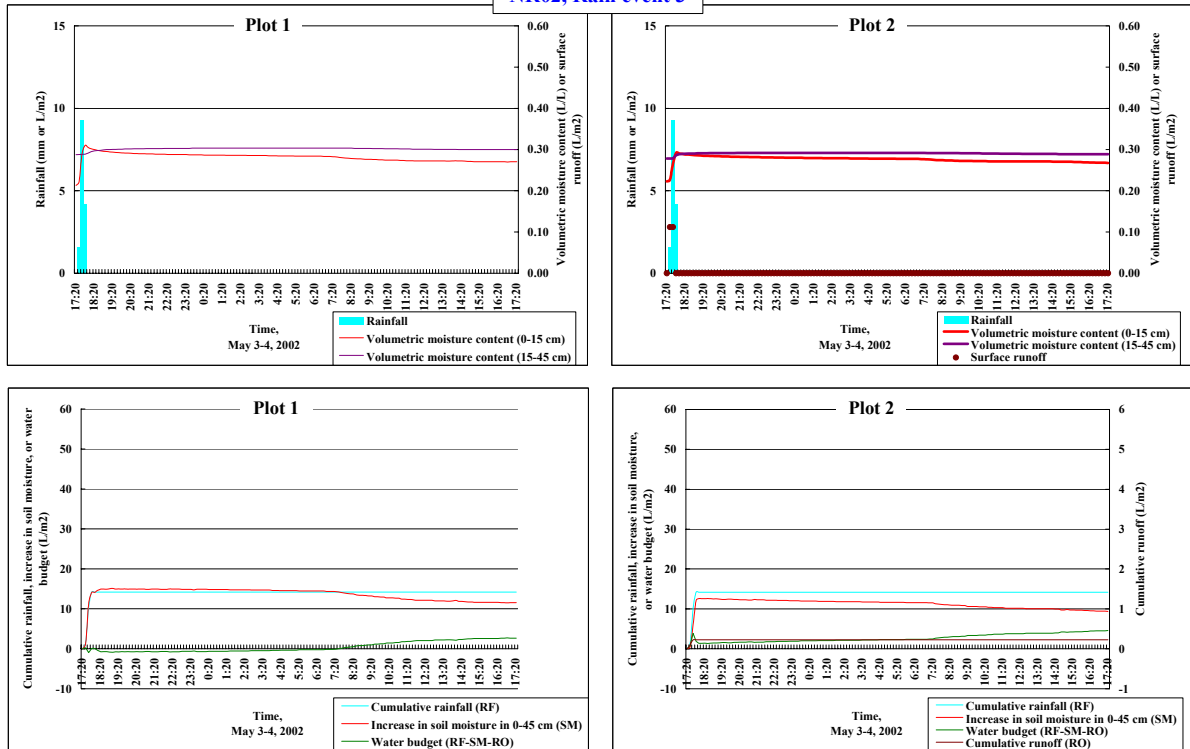


図6(1)．NRにおける各降雨時10分間隔の土壌体積含水率(上段グラフ赤・紫実線)、降雨量(上段グラフ水色縦棒)、表面流去水発生量(上段グラフ茶点)、累積降雨量(下段グラフ水色実線：A)、降雨開始時からの土壌水分増加量(下段グラフ赤実線：B)、累積表面流去水量(下段グラフ茶実線：C)、累積水収支(緑実線：A - B - C)の推移．



# NR02, Rain event 3



# NR02, Rain event 4

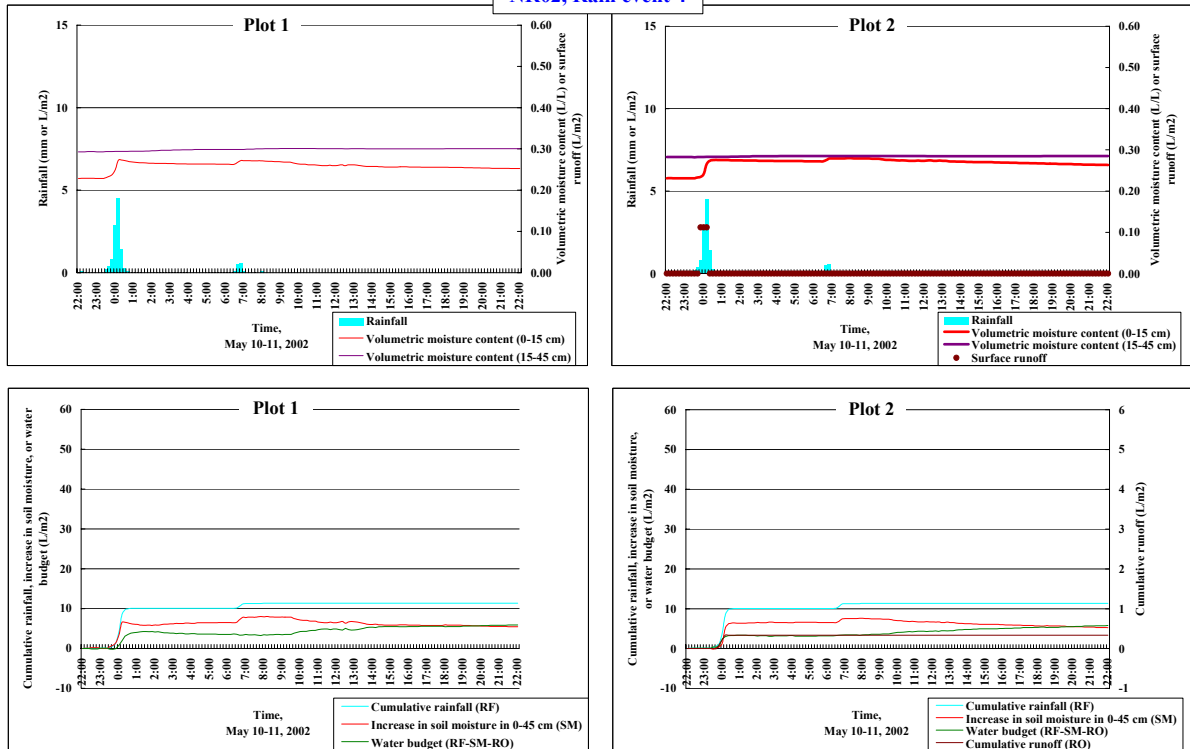
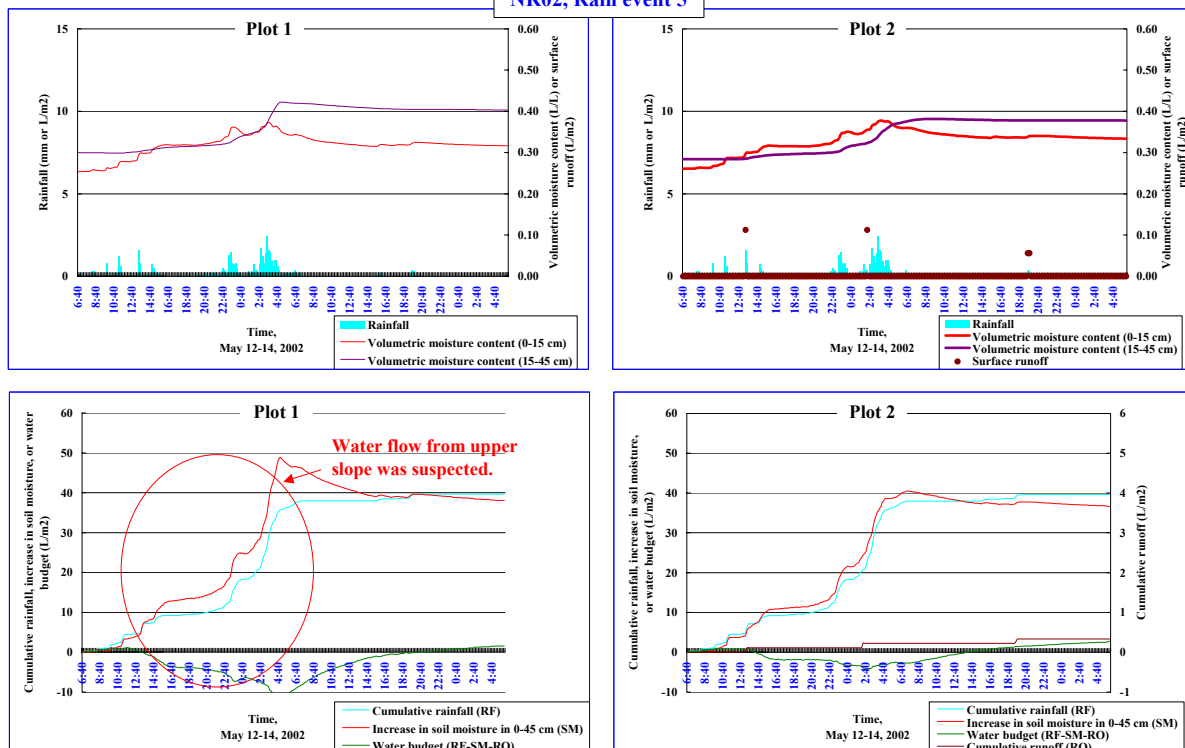


図6(2)．NRにおける各降雨時10分間隔の土壌体積含水率(上段グラフ赤・紫実線)、降雨量(上段グラフ水色縦棒)、表面流去水発生量(上段グラフ茶点)、累積降雨量(下段グラフ水色実線：A)、降雨開始時からの土壌水分増加量(下段グラフ赤実線：B)、累積表面流去水量(下段グラフ茶実線：C)、累積水収支(緑実線：A - B - C)の推移．

# NR02, Rain event 5



# NR02, Rain event 6

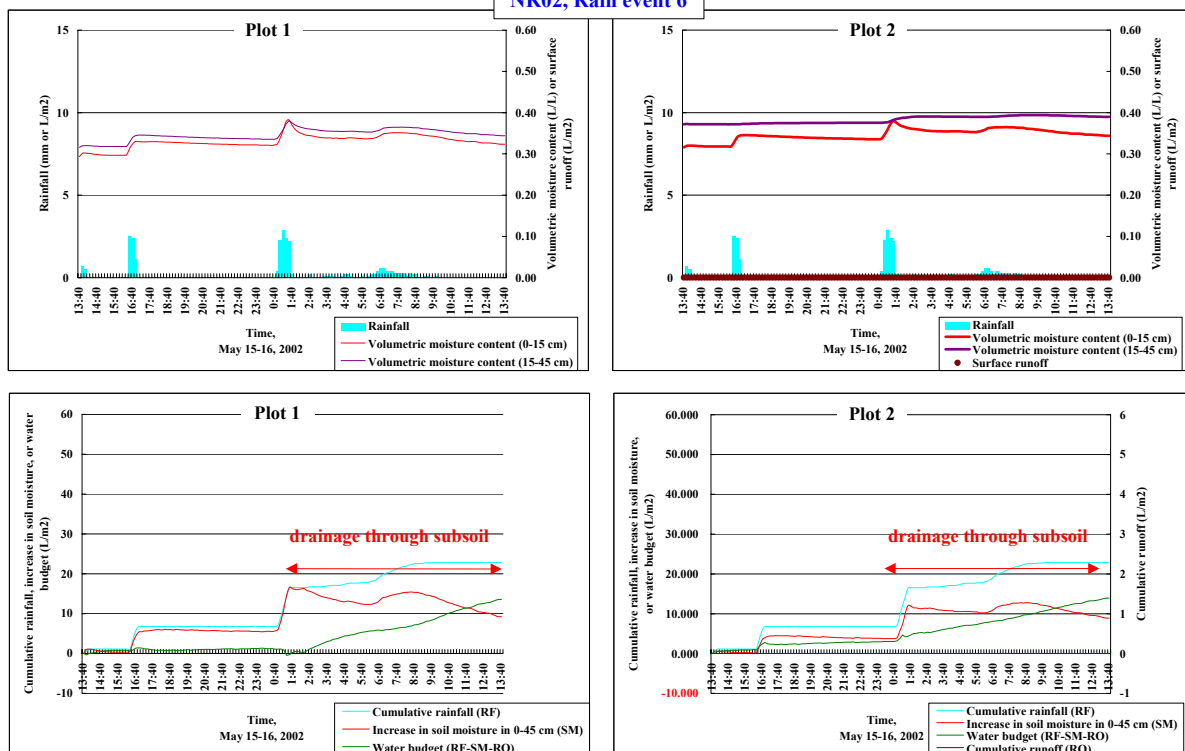


図6(3) . NRにおける各降雨時10分間隔の土壌体積含水率(上段グラフ赤・紫実線)、降雨量(上段グラフ水色縦棒)、表面流去水発生量(上段グラフ茶点)、累積降雨量(下段グラフ水色実線：A)、降雨開始時からの土壌水分増加量(下段グラフ赤実線：B)、累積表面流去水量(下段グラフ茶実線：C)、累積水収支(緑実線：A - B - C)の推移 .

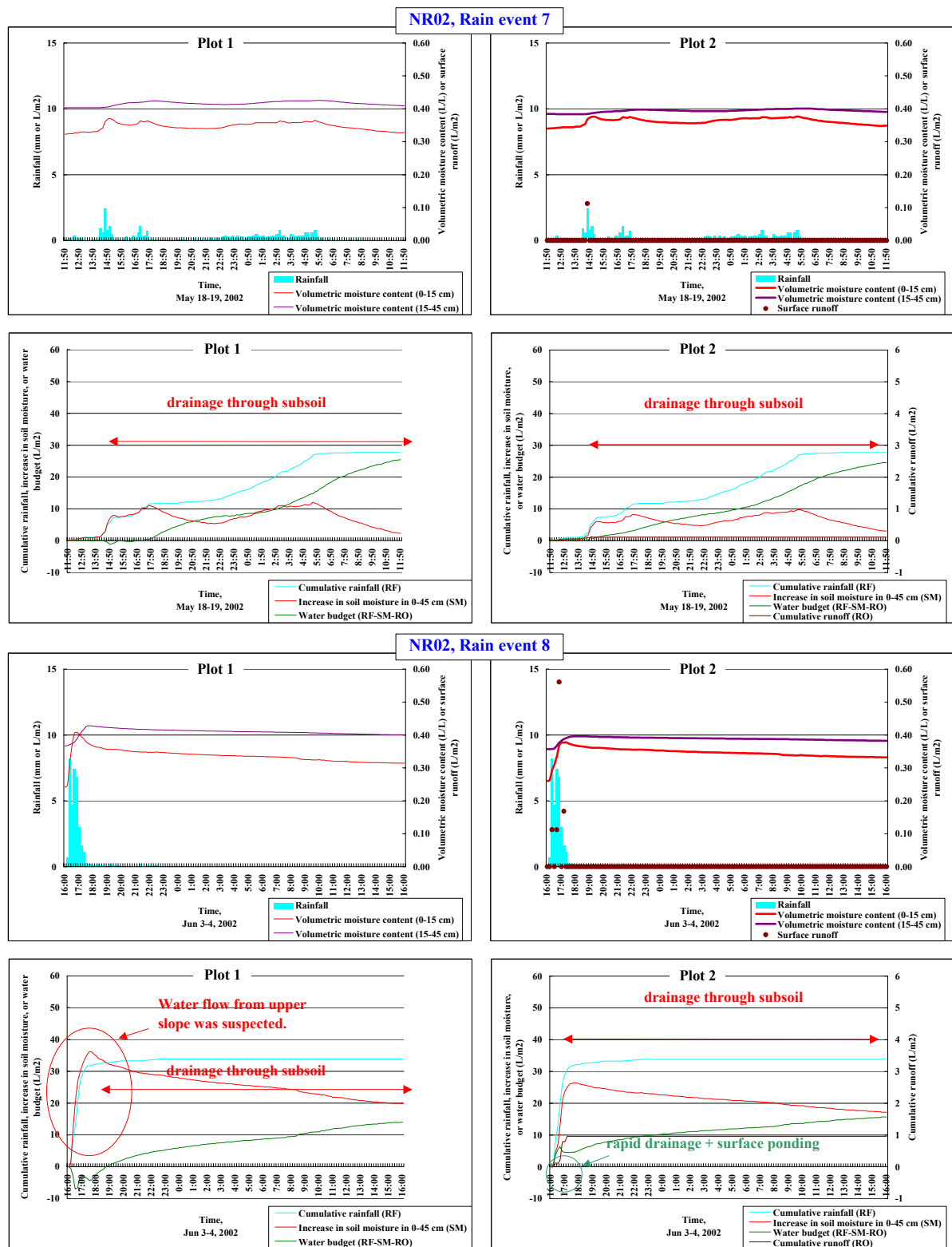
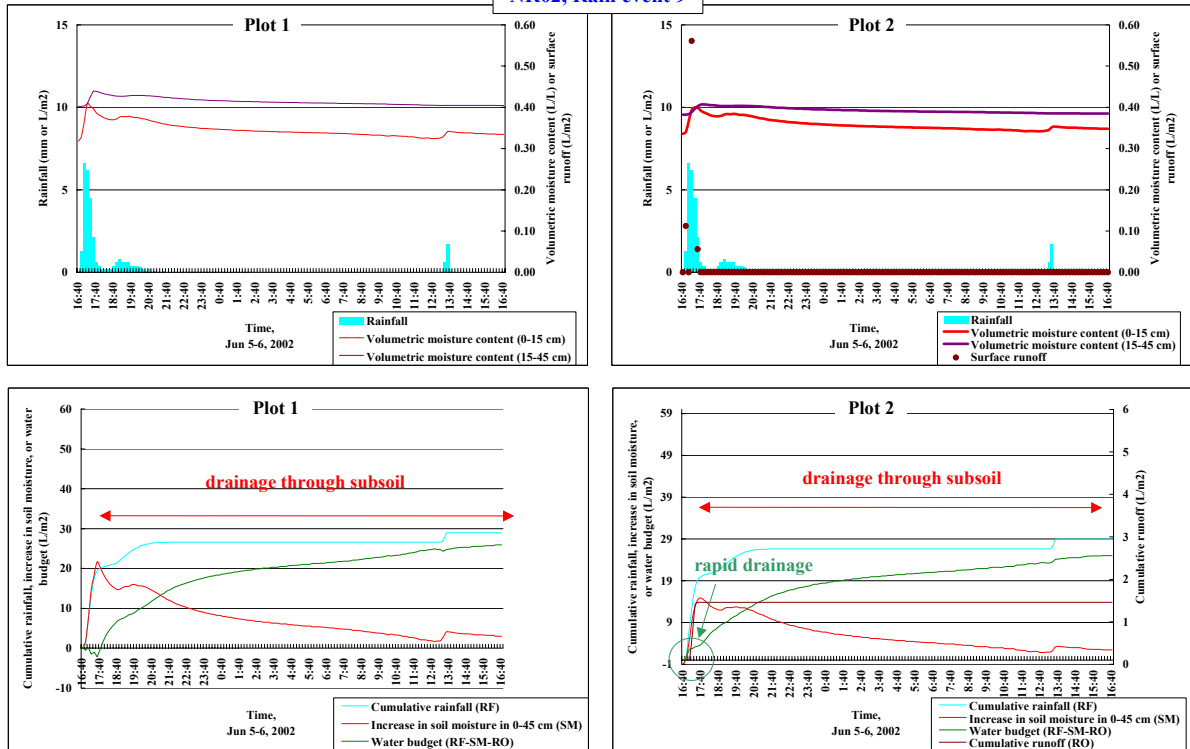


図6(4) . NRにおける各降雨時10分間隔の土壌体積含水率(上段グラフ赤・紫実線)、降雨量(上段グラフ水色縦棒)、表面流去水発生量(上段グラフ茶点)、累積降雨量(下段グラフ水色実線：A)、降雨開始時から土壌水分増加量(下段グラフ赤実線：B)、累積表面流去水量(下段グラフ茶実線：C)、累積水収支(緑実線：A - B - C)の推移 .

NR02, Rain event 9



NR02, Rain event 10

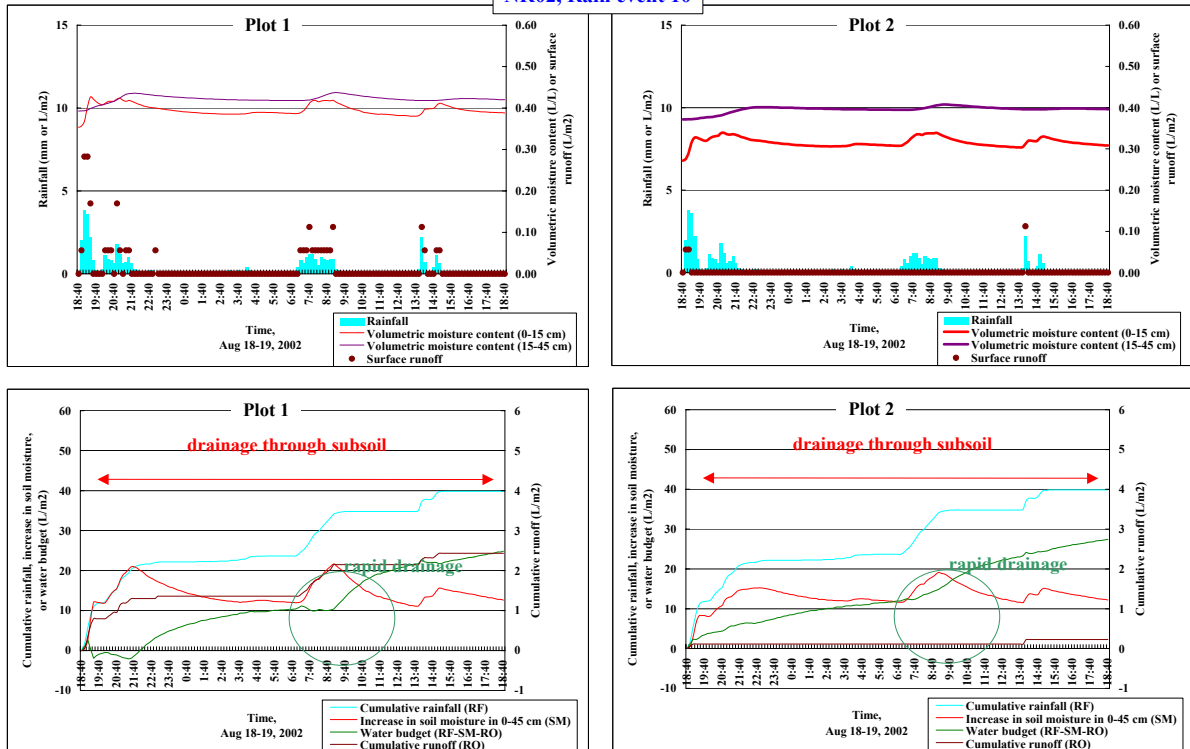
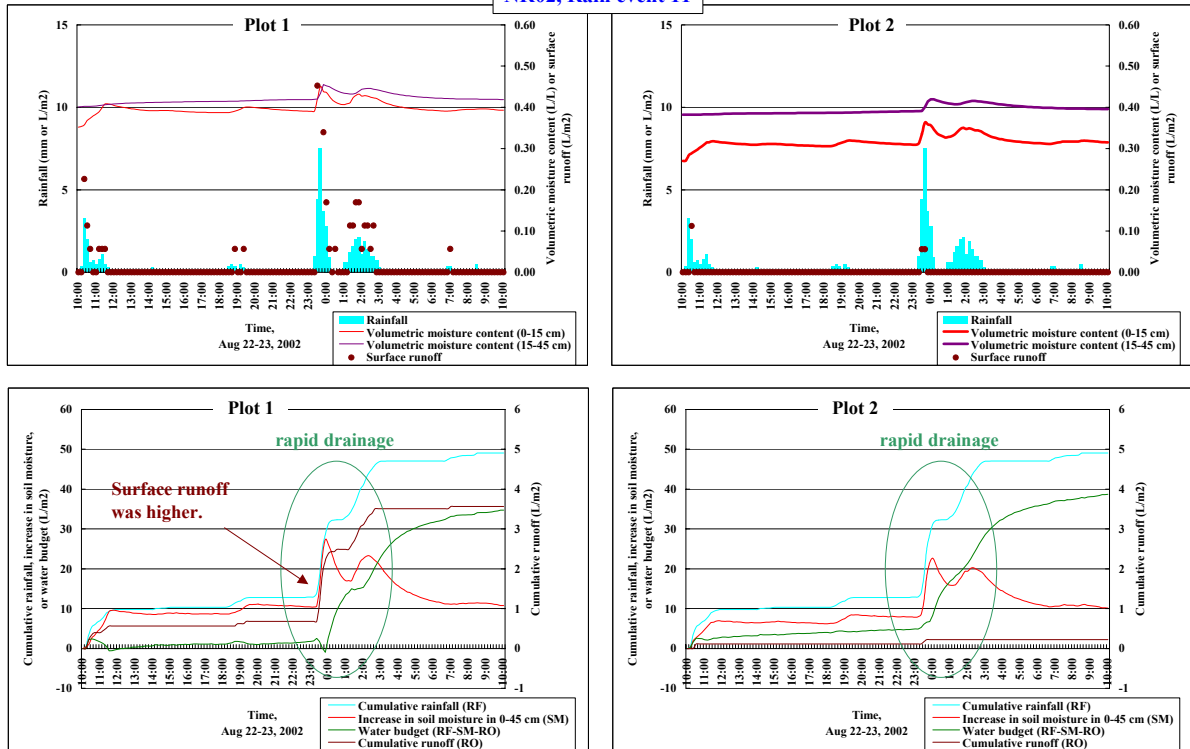


図6(5) . NRにおける各降雨時10分間隔の土壌体積含水率(上段グラフ赤・紫実線)、降雨量(上段グラフ水色縦棒)、表面流去水発生量(上段グラフ茶点)、累積降雨量(下段グラフ水色実線 : A)、降雨開始時からの土壌水分増加量(下段グラフ赤実線 : B)、累積表面流去水量(下段グラフ茶実線 : C)、累積水収支(緑実線 : A - B - C)の推移 .

# NR02, Rain event 11



# NR02, Rain event 12

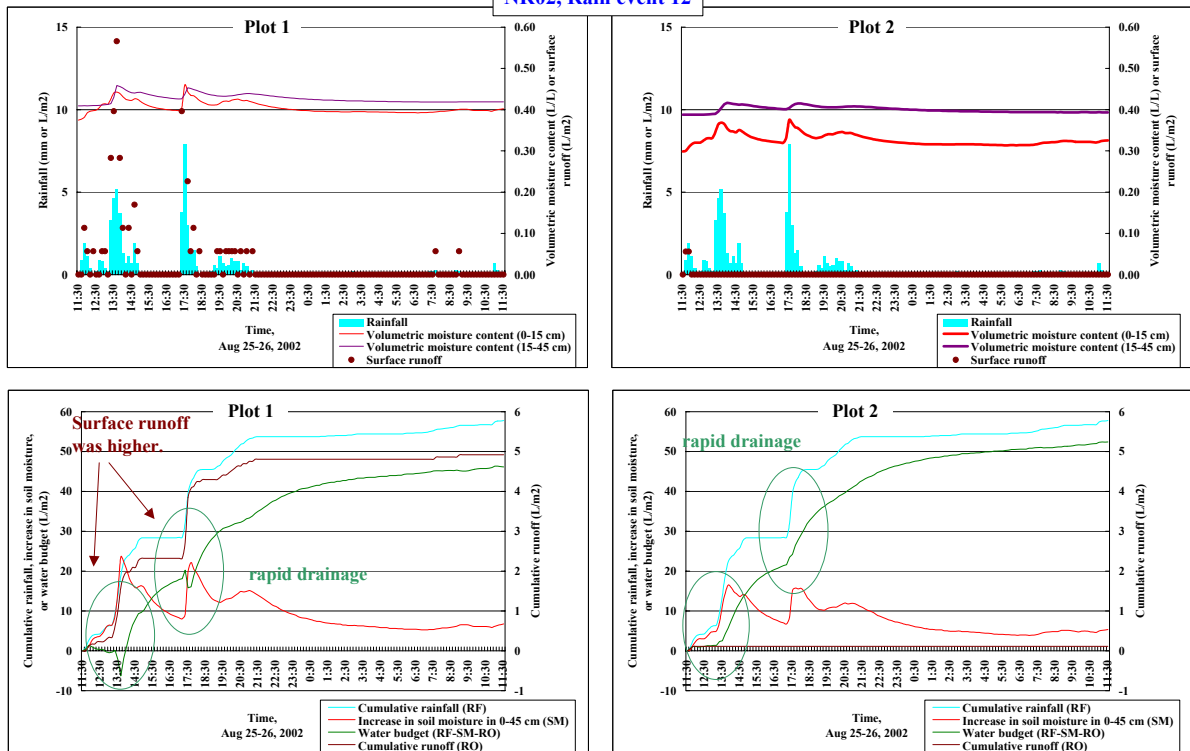
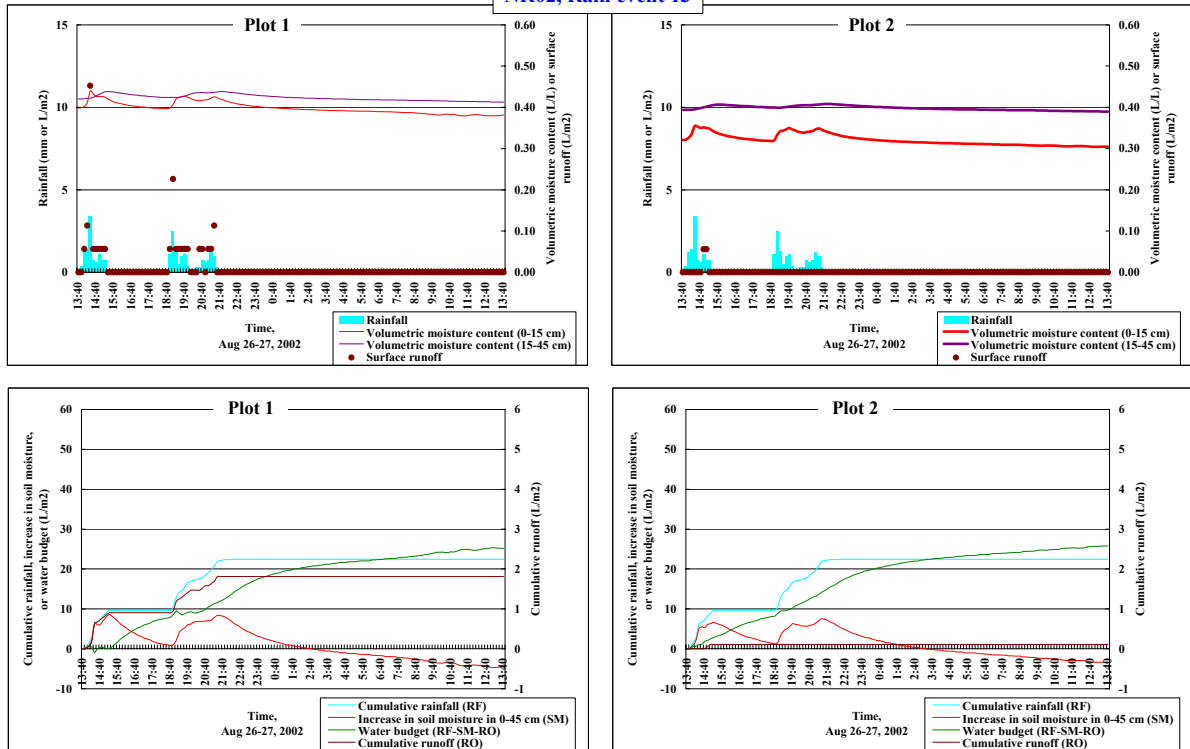


図6(6) . NRにおける各降雨時10分間隔の土壌体積含水率(上段グラフ赤・紫実線)、降雨量(上段グラフ水色縦棒)、表面流去水発生量(上段グラフ茶点)、累積降雨量(下段グラフ水色実線：A)、降雨開始時からの土壌水分増加量(下段グラフ赤実線：B)、累積表面流去水量(下段グラフ茶実線：C)、累積水収支(緑実線：A - B - C)の推移 .

# NR02, Rain event 13



# NR02, Rain event 14

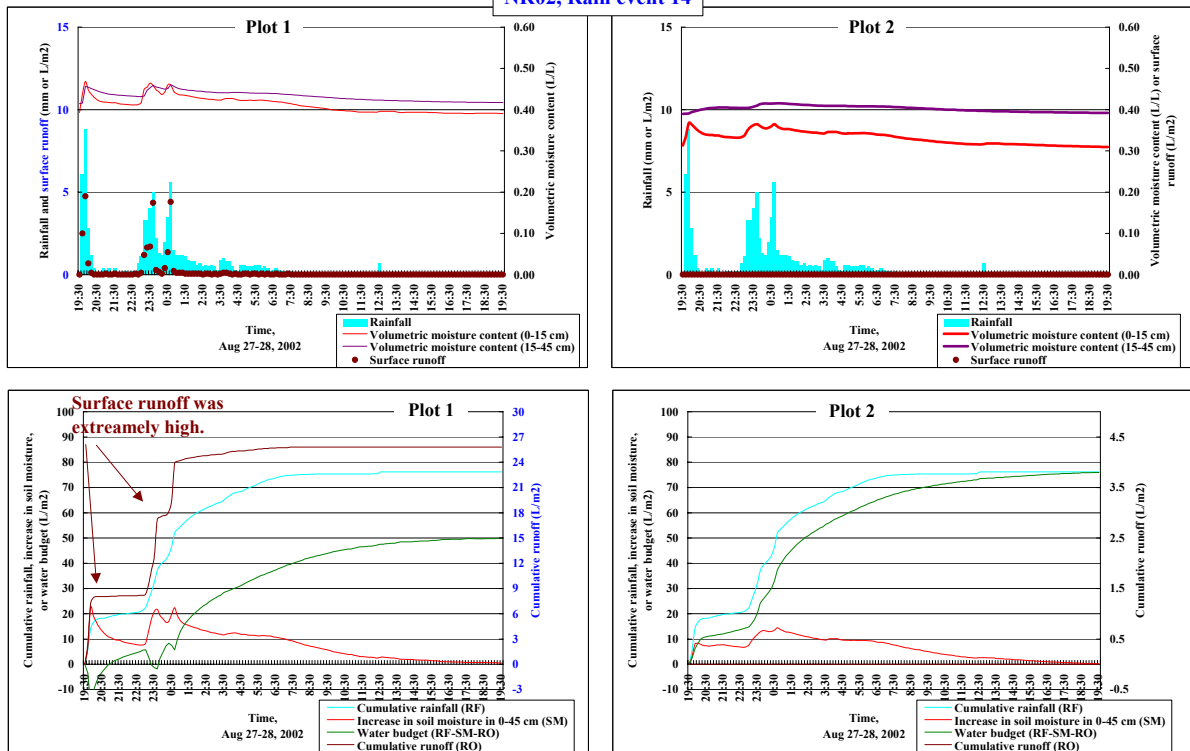
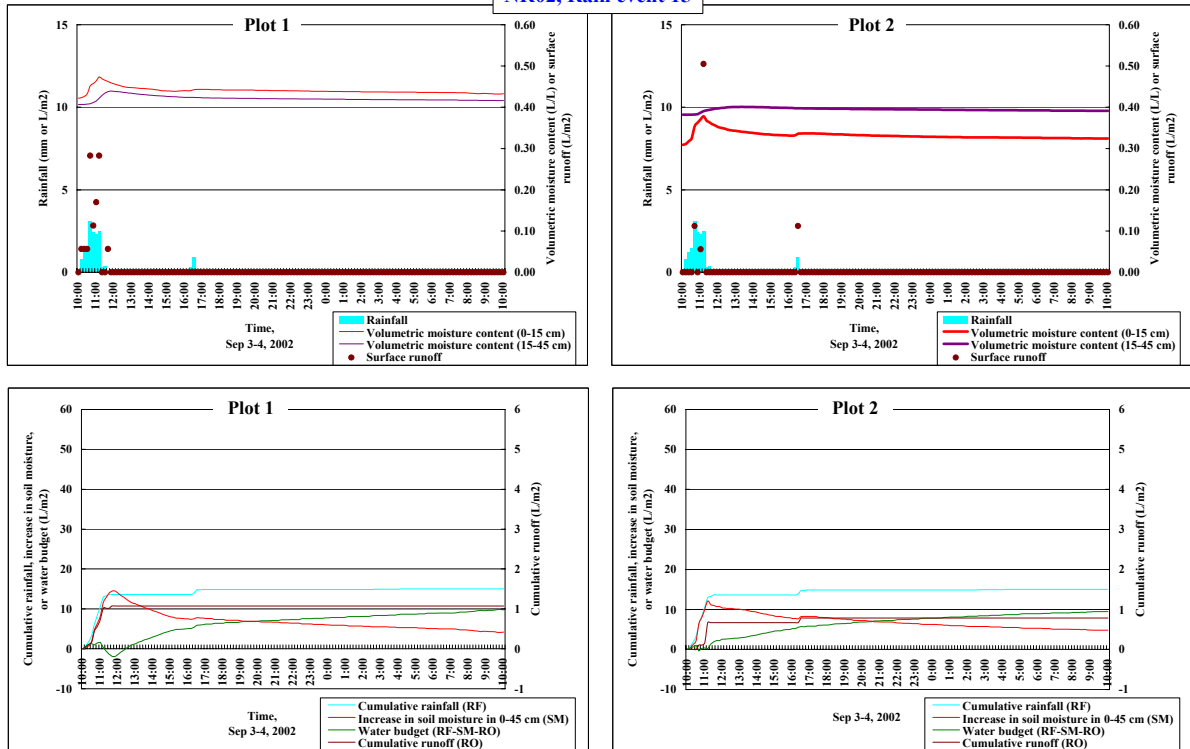


図6(7) . NRにおける各降雨時10分間隔の土壌体積含水率(上段グラフ赤・紫実線)、降雨量(上段グラフ水色縦棒)、表面流去水発生量(上段グラフ茶点)、累積降雨量(下段グラフ水色実線：A)、降雨開始時からの土壌水分増加量(下段グラフ赤実線：B)、累積表面流去水量(下段グラフ茶実線：C)、累積水収支(緑実線：A - B - C)の推移 .

# NR02, Rain event 15



# NR02, Rain event 16

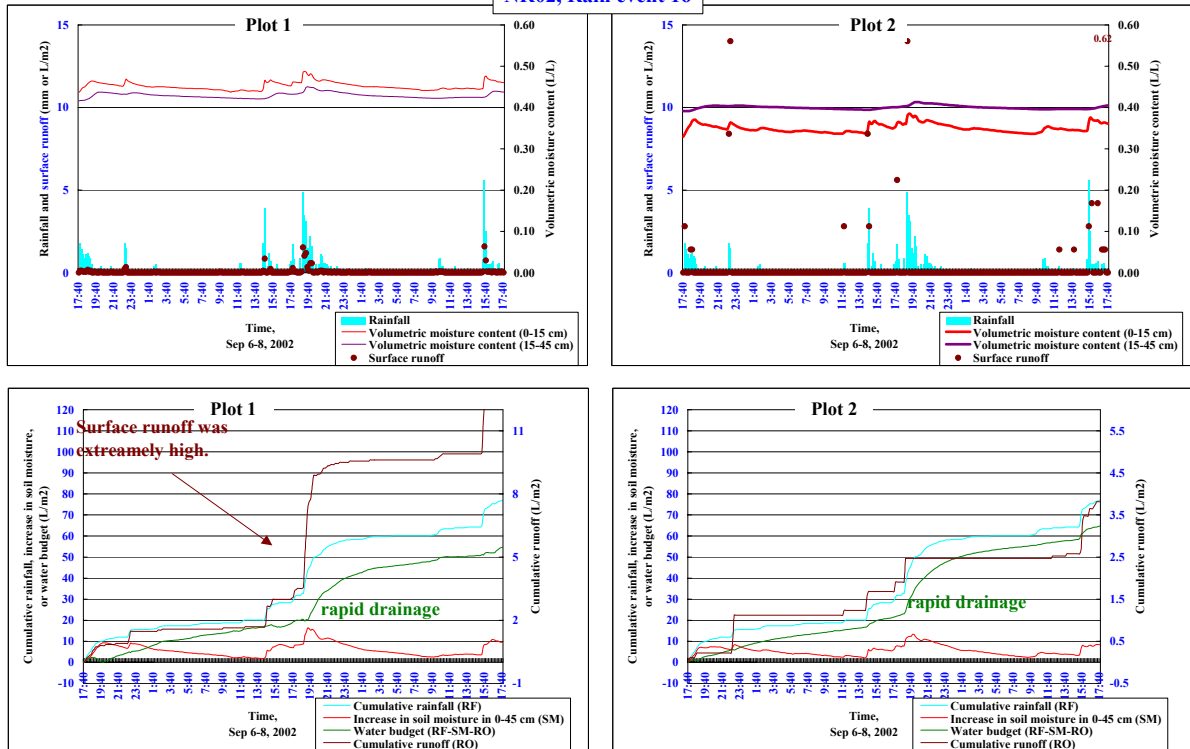
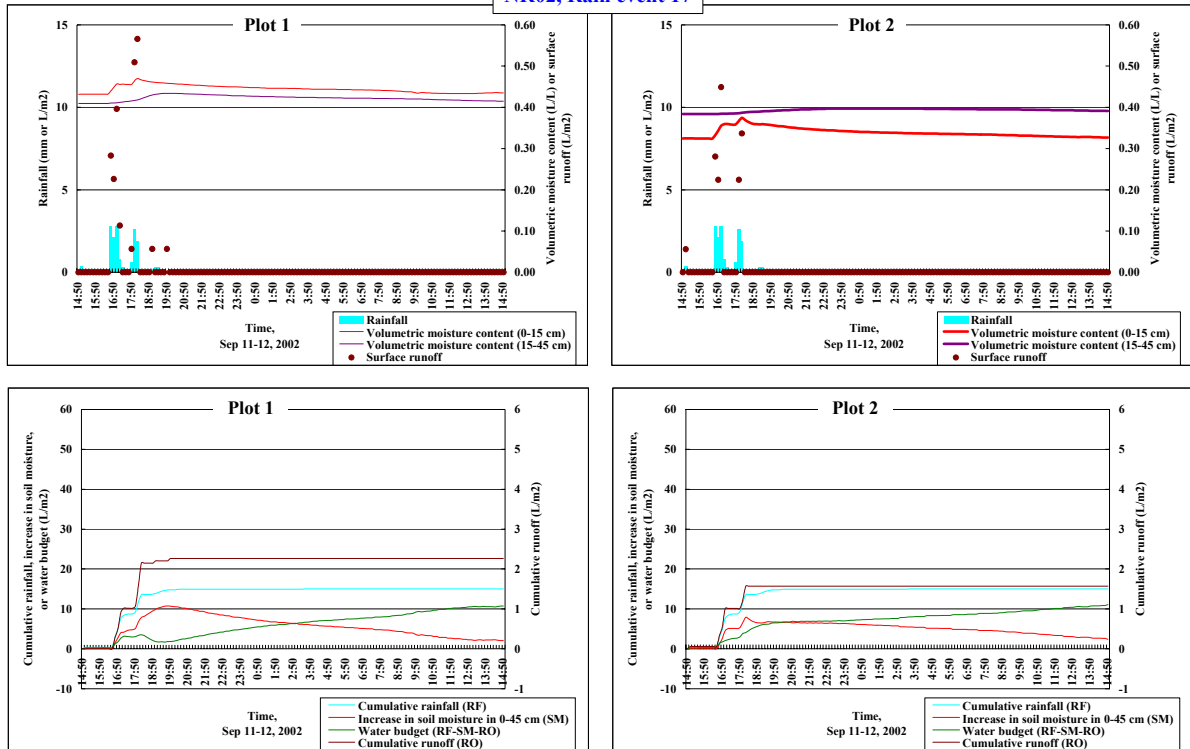
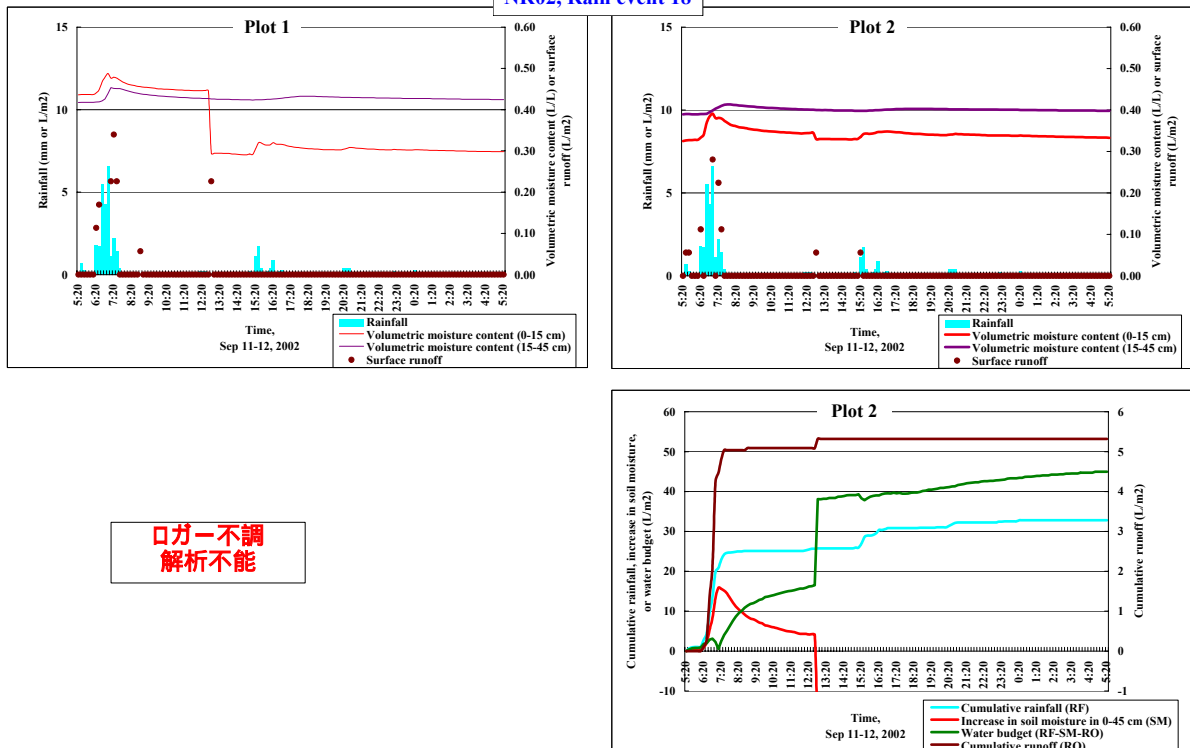


図6(8) . NRにおける各降雨時10分間隔の土壌体積含水率(上段グラフ赤・紫実線)、降雨量(上段グラフ水色縦棒)、表面流去水発生量(上段グラフ茶点)、累積降雨量(下段グラフ水色実線：A)、降雨開始時からの土壌水分増加量(下段グラフ赤実線：B)、累積表面流去水量(下段グラフ茶実線：C)、累積水収支(緑実線：A - B - C)の推移 .

# NR02, Rain event 17



# NR02, Rain event 18

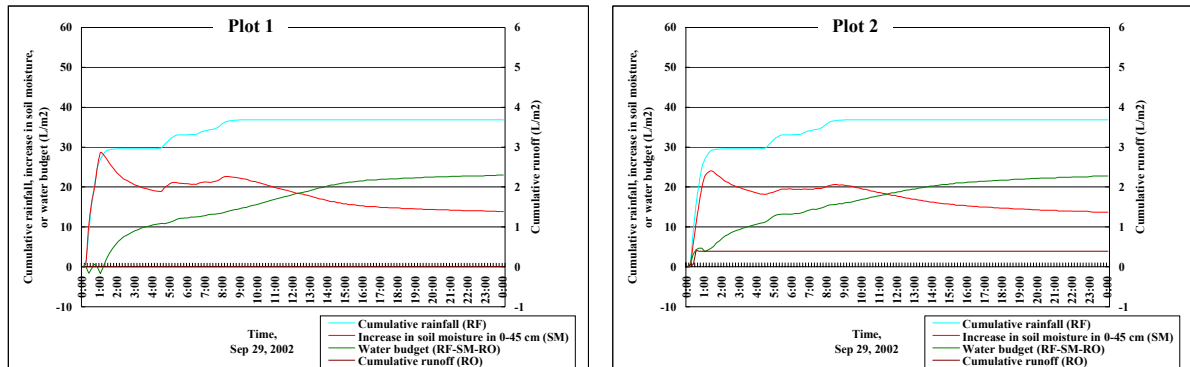
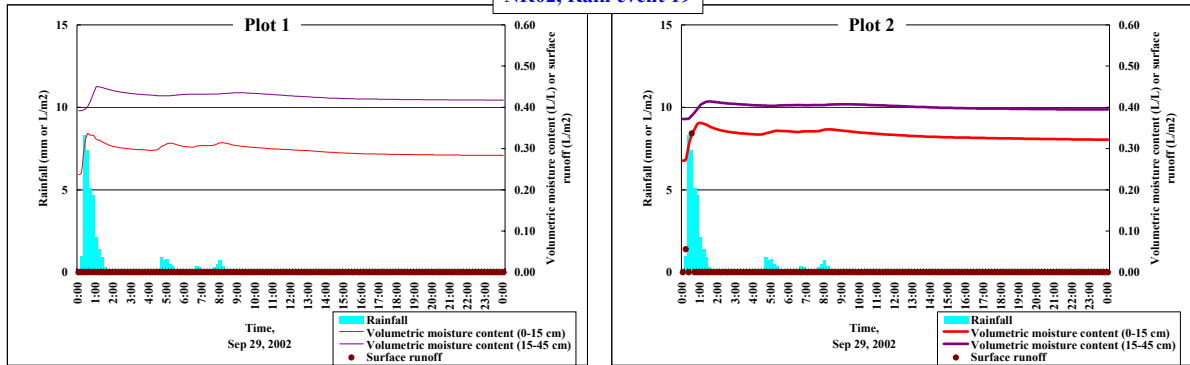


ロガー不調  
解析不能

図6(9) . NRにおける各降雨時10分間隔の土壌体積含水率(上段グラフ赤・紫実線)、降雨量(上段グラフ水色縦棒)、表面流去水発生量(上段グラフ茶点)、累積降雨量(下段グラフ水色実線 : A)、降雨開始時からの土壌水分増加量(下段グラフ赤実線 : B)、累積表面流去水量(下段グラフ茶実線 : C)、累積水収支(緑実線 : A - B - C)の推移 .



# NR02, Rain event 19



# NR02, Rain event 20

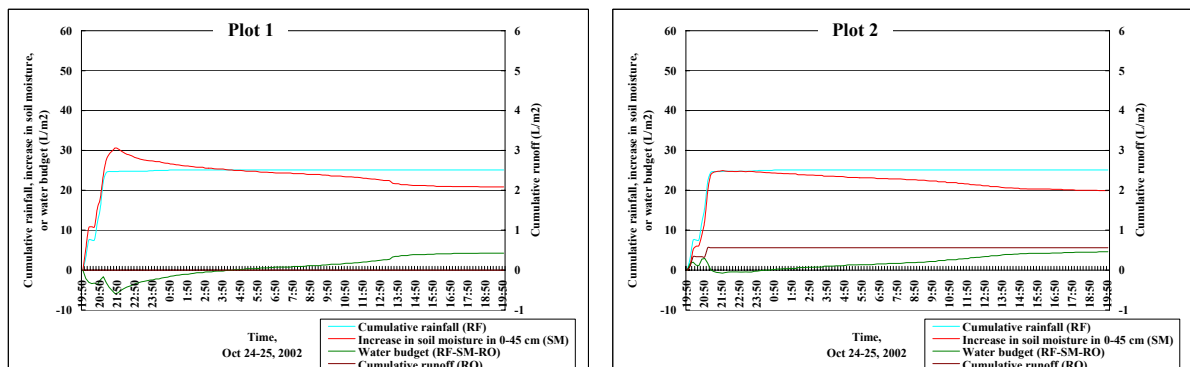
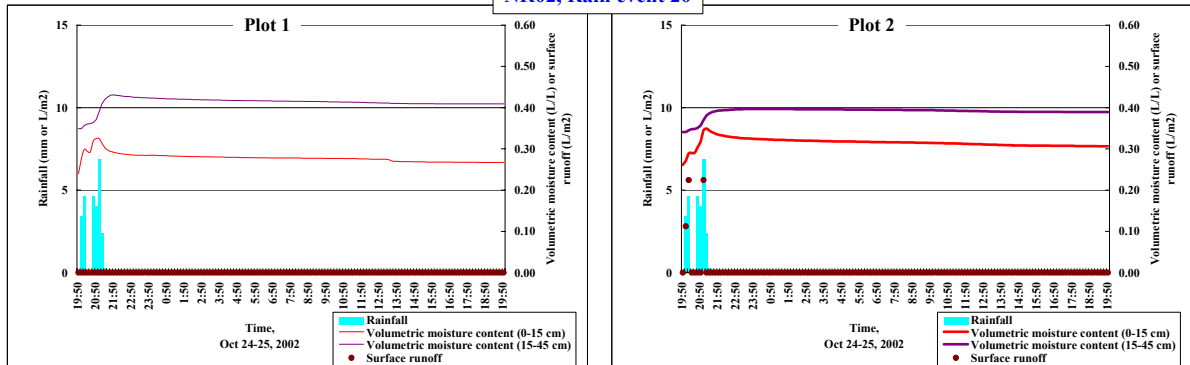
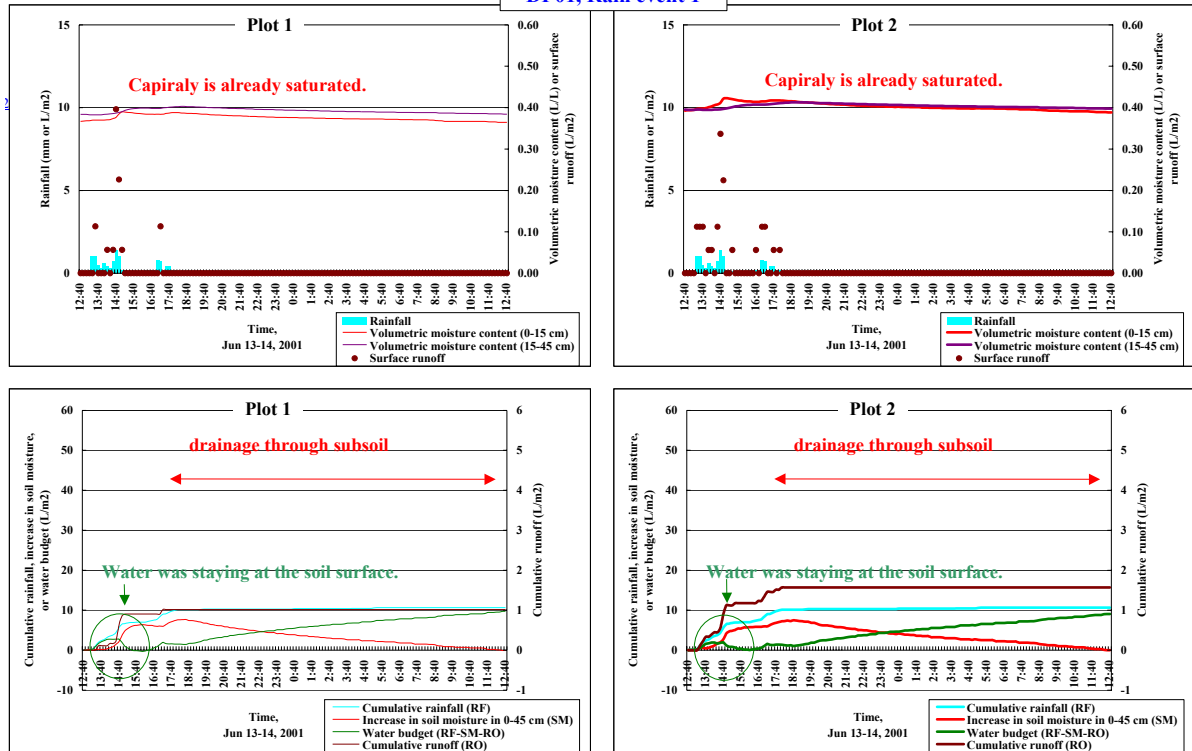


図6(10) . NRにおける各降雨時10分間隔の土壌体積含水率(上段グラフ赤・紫実線)、降雨量(上段グラフ水色縦棒)、表面流去水発生量(上段グラフ茶点)、累積降雨量(下段グラフ水色実線：A)、降雨開始時からの土壌水分増加量(下段グラフ赤実線：B)、累積表面流去水量(下段グラフ茶実線：C)、累積水収支(緑実線：A - B - C)の推移 .

# DP01, Rain event 1



# DP01, Rain event 2

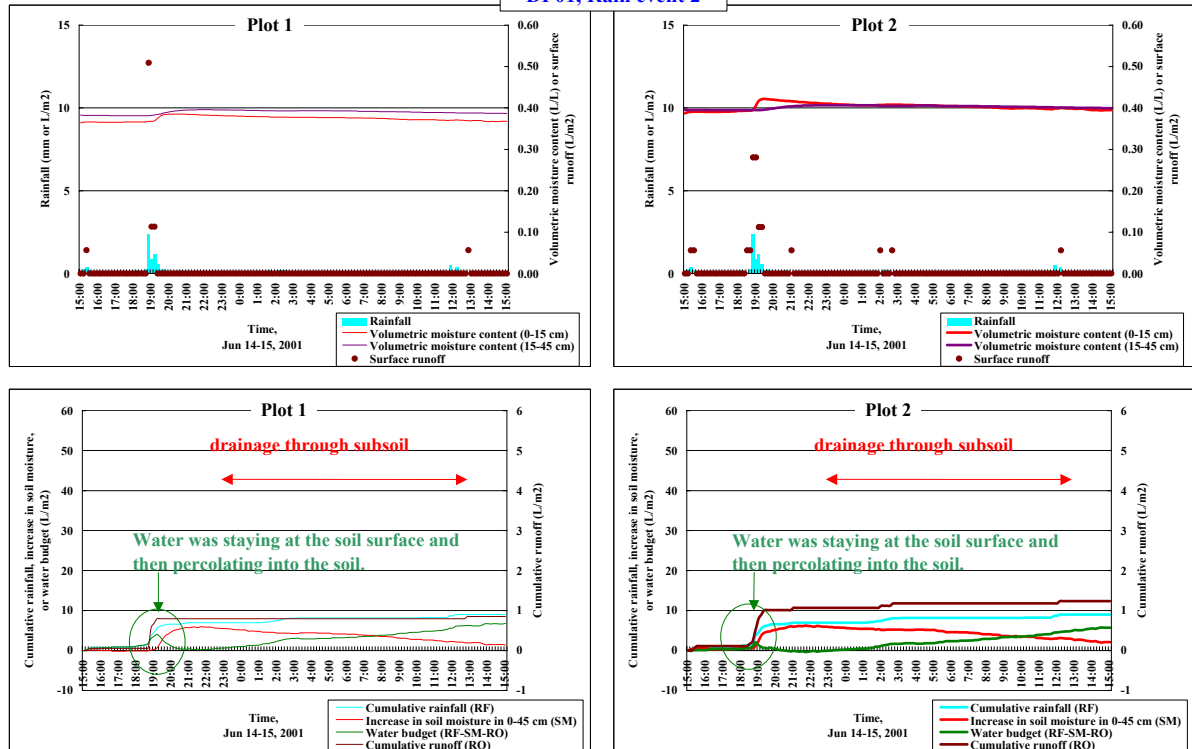
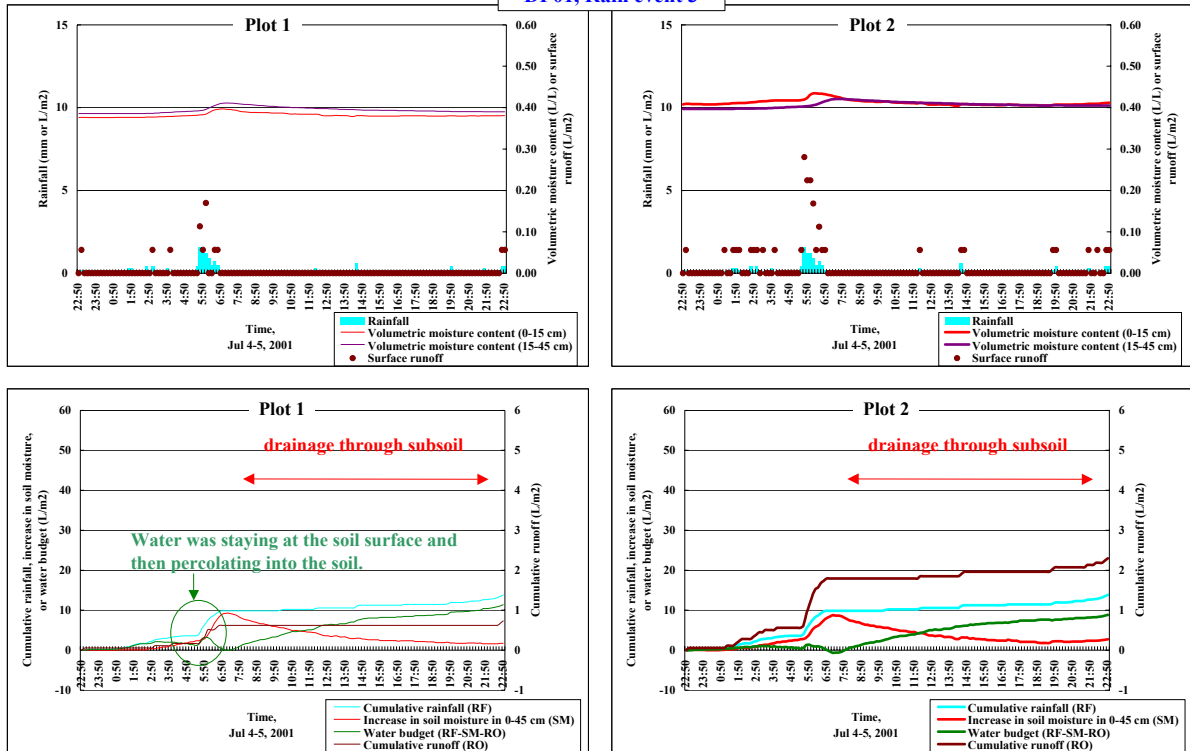


図7(1) . DPにおける各降雨時10分間隔の土壌体積含水率(上段グラフ赤・紫実線)、降雨量(上段グラフ水色縦棒)、表面流去水発生量(上段グラフ茶点)、累積降雨量(下段グラフ水色実線 : A)、降雨開始時からの土壌水分増加量(下段グラフ赤実線 : B)、累積表面流去水量(下段グラフ茶実線 : C)、累積水収支(緑実線 : A - B - C)の推移 .

### DP01, Rain event 3



### DP01, Rain event 4

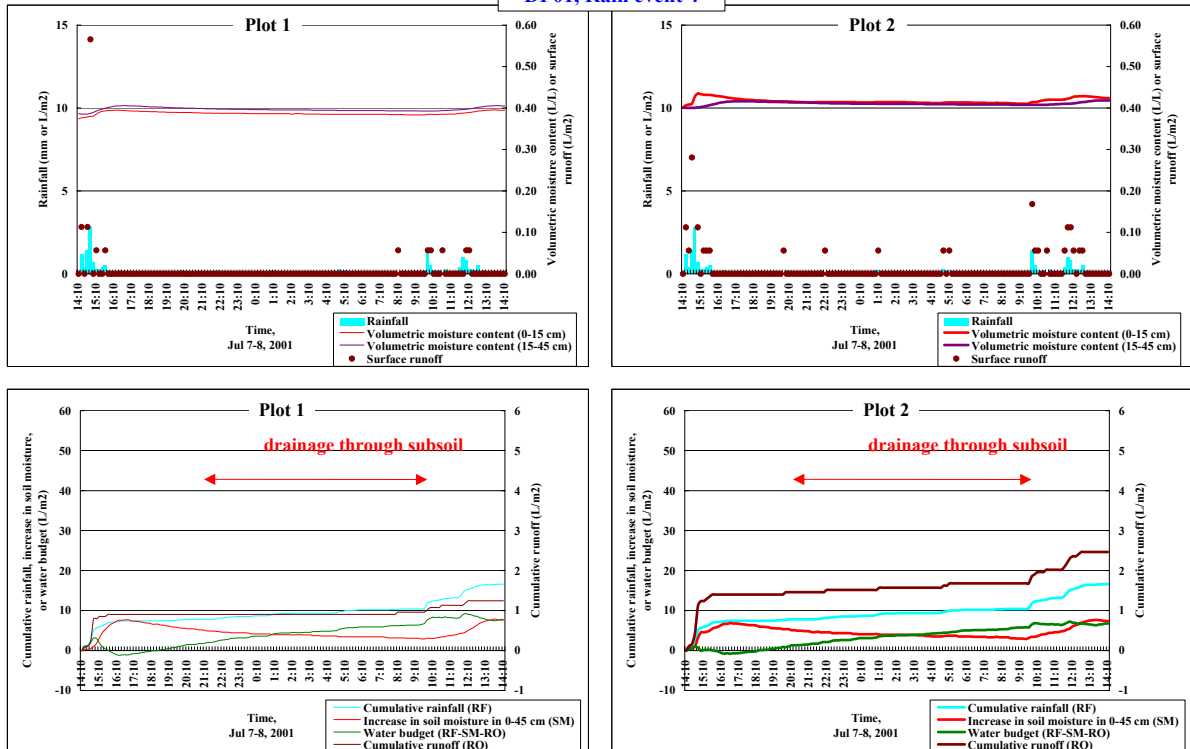


図7(2) . DPにおける各降雨時10分間隔の土壌体積含水率(上段グラフ赤・紫実線)、降雨量(上段グラフ水色縦棒)、表面流去水発生量(上段グラフ茶点)、累積降雨量(下段グラフ水色実線 : A)、降雨開始時からの土壌水分増加量(下段グラフ赤実線 : B)、累積表面流去水量(下段グラフ茶実線 : C)、累積水収支(緑実線 : A - B - C)の推移 .

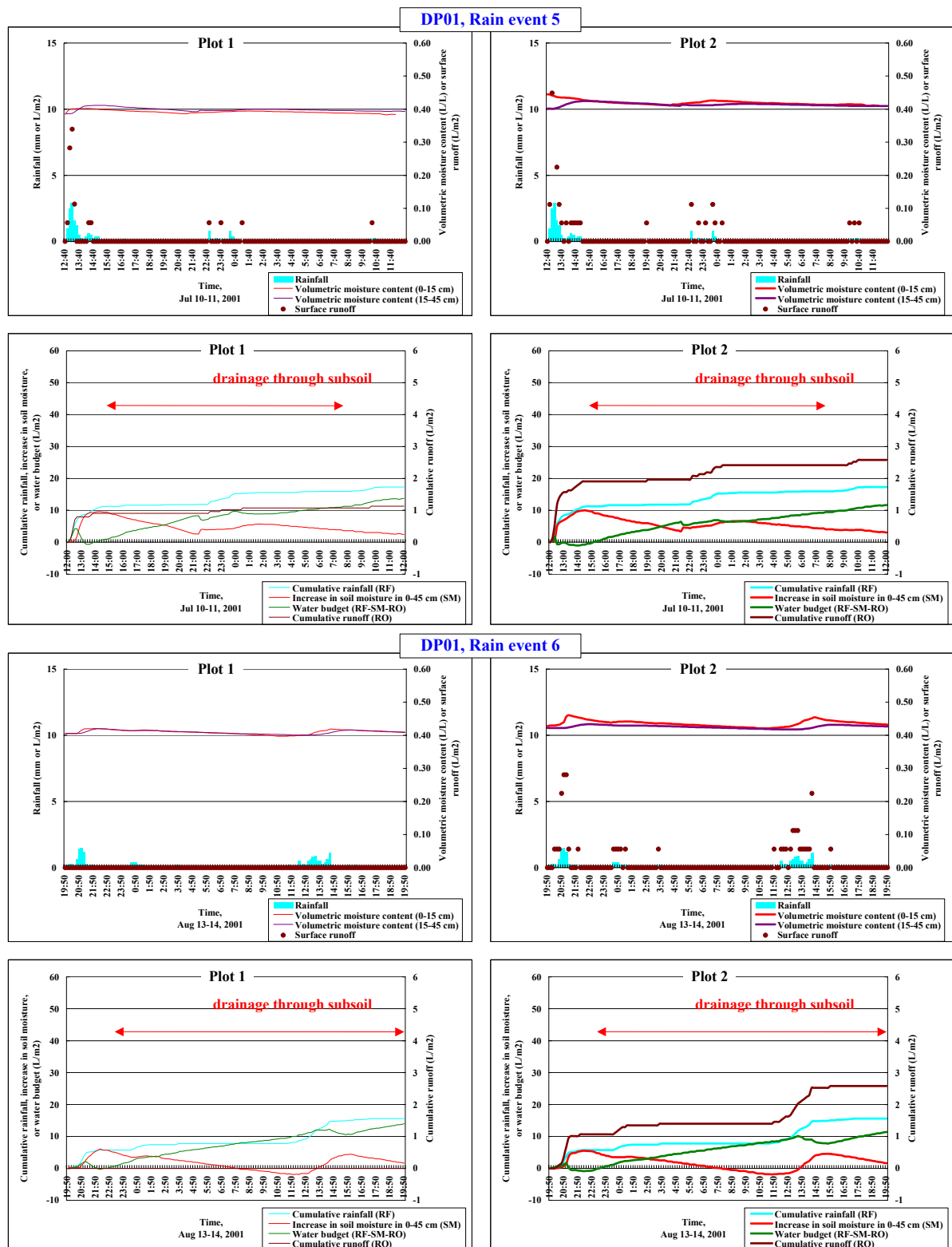
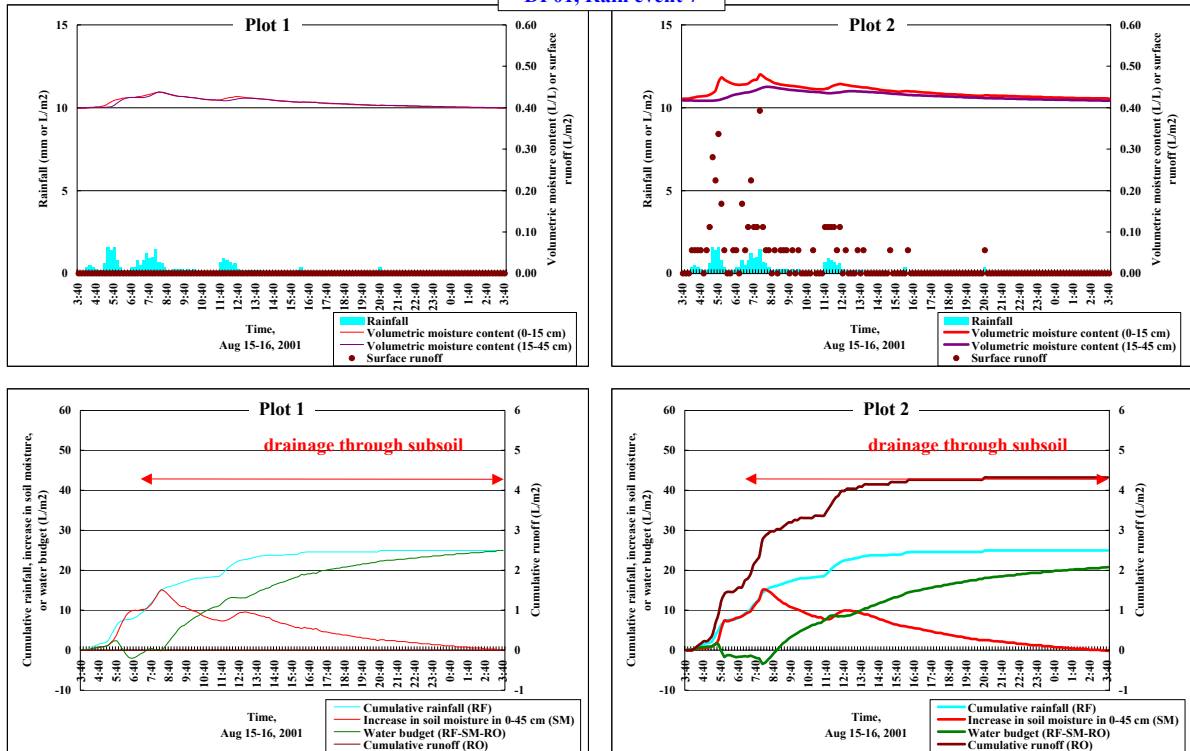


図7(3) . DPにおける各降雨時10分間隔の土壌体積含水率(上段グラフ赤・紫実線)、降雨量(上段グラフ水色縦棒)、表面流去水発生量(上段グラフ茶点)、累積降雨量(下段グラフ水色実線 : A)、降雨開始時からの土壌水分増加量(下段グラフ赤実線 : B)、累積表面流去水量(下段グラフ茶実線 : C)、累積水収支(緑実線 : A - B - C)の推移 .

DP01, Rain event 7



DP01, Rain event 8

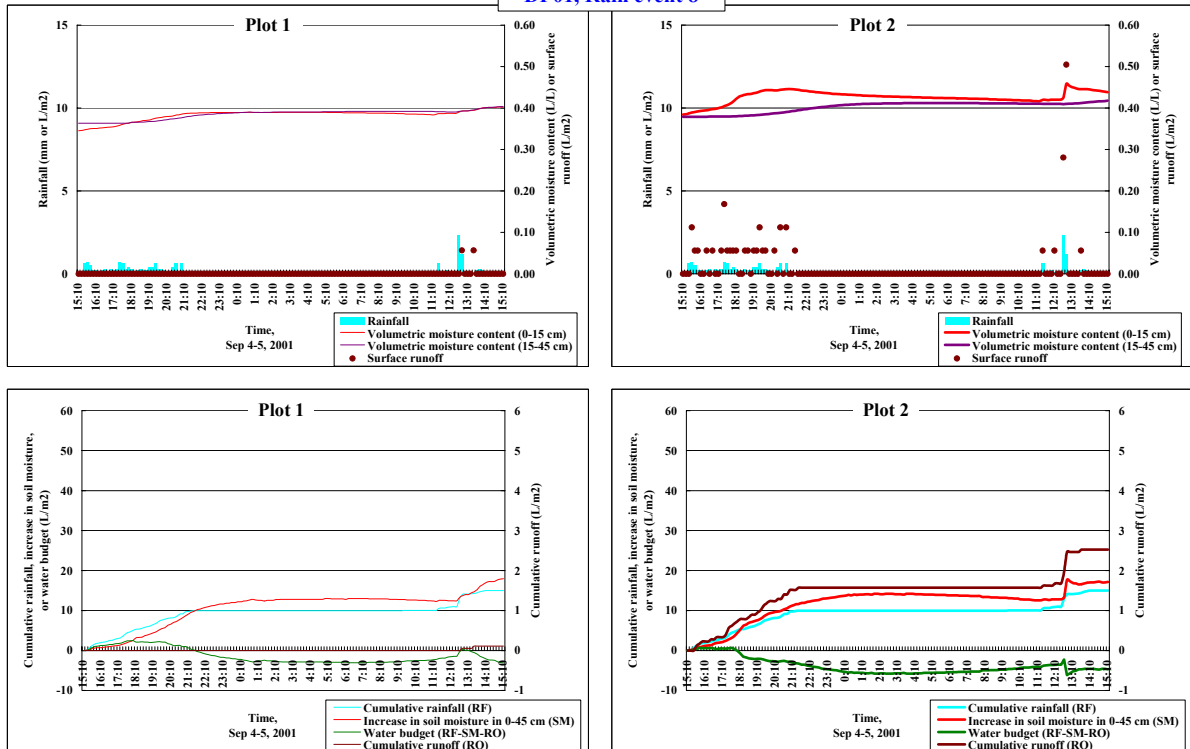
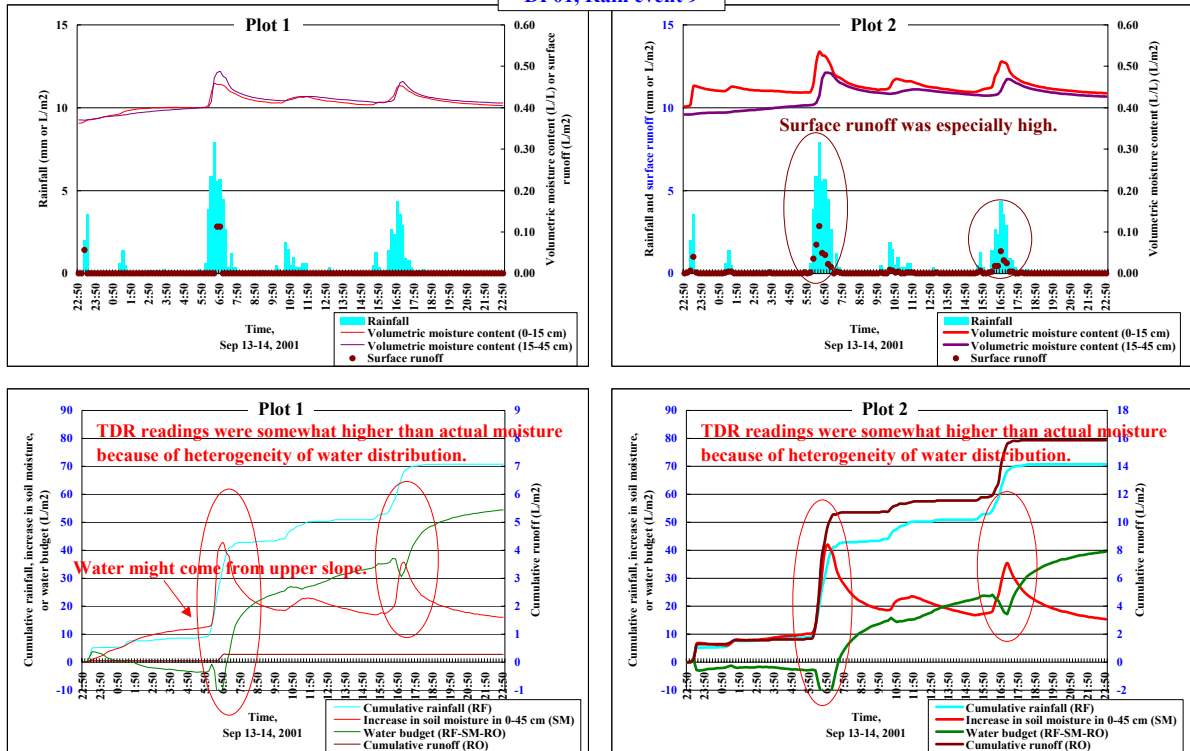


図7(4)．DPにおける各降雨時10分間隔の土壌体積含水率(上段グラフ赤・紫実線)、降雨量(上段グラフ水色縦棒)、表面流去水発生量(上段グラフ茶点)、累積降雨量(下段グラフ水色実線：A)、降雨開始時からの土壌水分増加量(下段グラフ赤実線：B)、累積表面流去水量(下段グラフ茶実線：C)、累積水収支(緑実線：A - B - C)の推移．

# DP01, Rain event 9



# DP01, Rain event 10

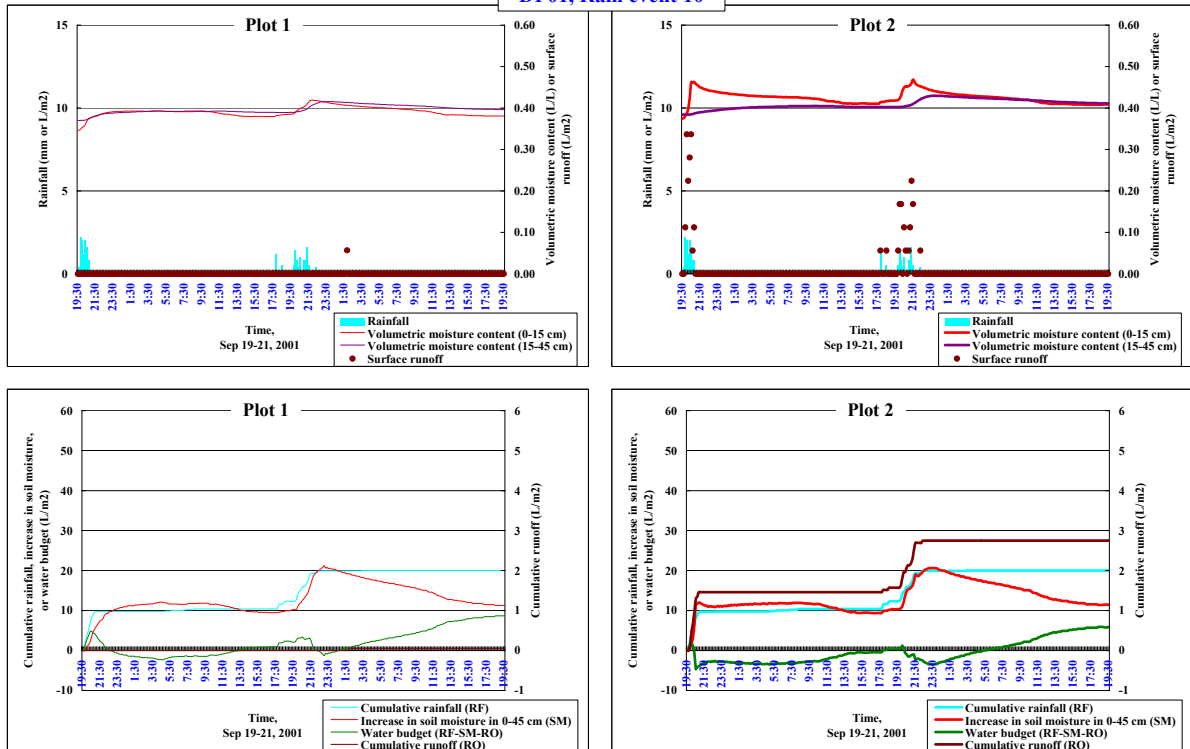


図7(5) . DPにおける各降雨時10分間隔の土壌体積含水率(上段グラフ赤・紫実線)、降雨量(上段グラフ水色縦棒)、表面流去水発生量(上段グラフ茶点)、累積降雨量(下段グラフ水色実線 : A、降雨開始時からの土壌水分増加量(下段グラフ赤実線 : B)、累積表面流去水量(下段グラフ茶実線 : C)、累積水収支(緑実線 : A - B - C)の推移 .

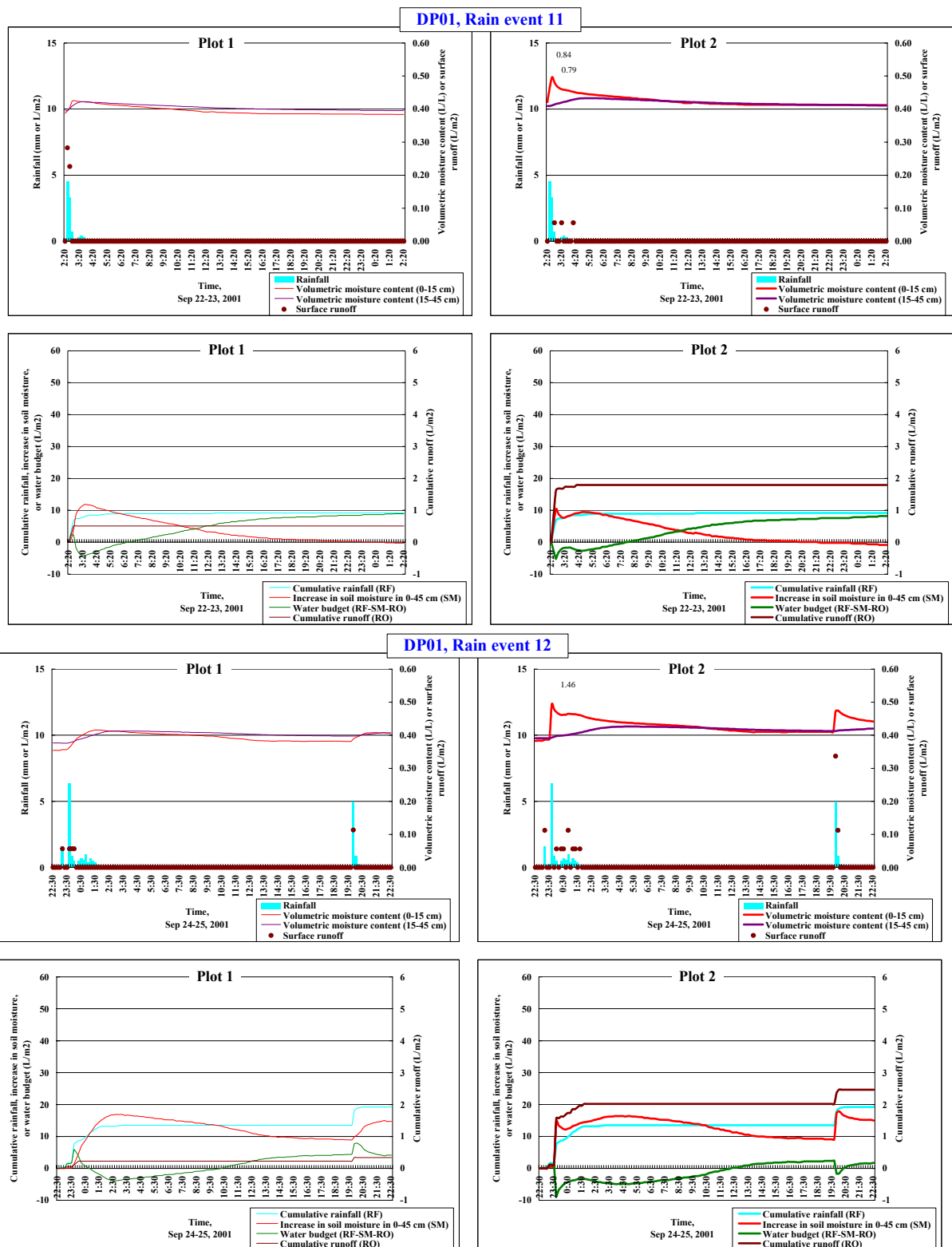
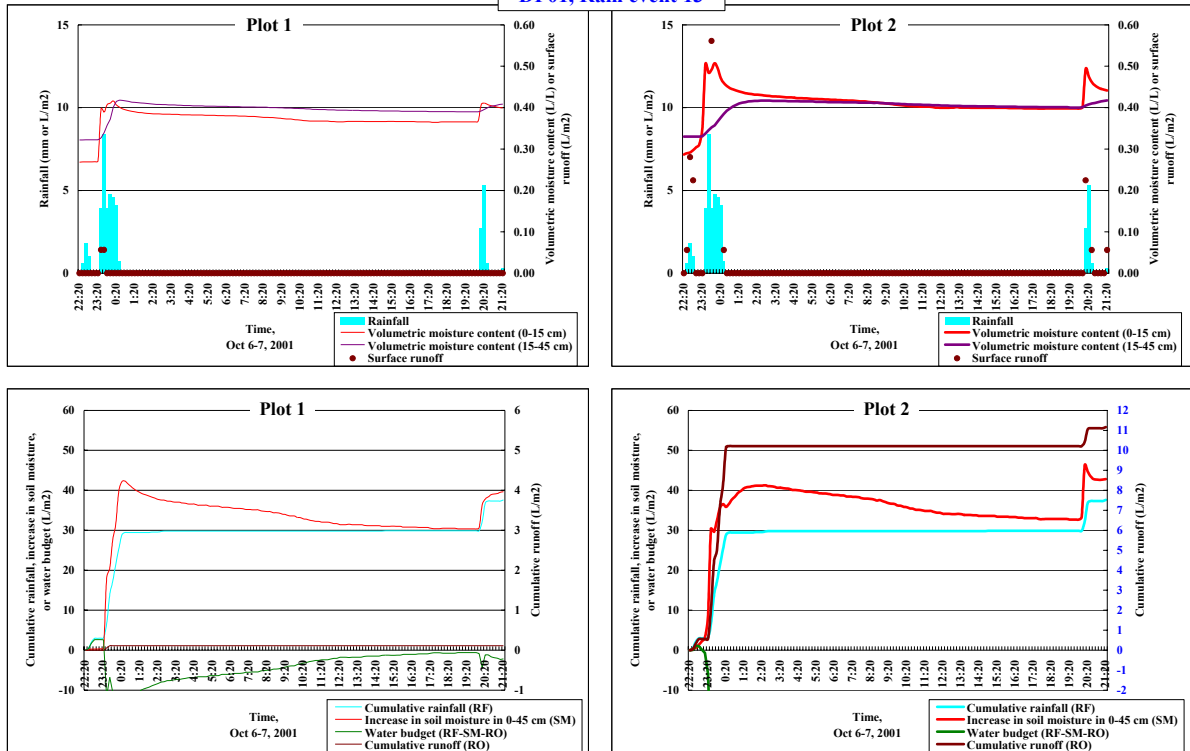


図7(6) . DPにおける各降雨時10分間隔の土壌体積含水率(上段グラフ赤・紫実線)、降雨量(上段グラフ水色縦棒)、表面流去水発生量(上段グラフ茶点)、累積降雨量(下段グラフ水色実線 : A)、降雨開始時からの土壌水分増加量(下段グラフ赤実線 : B)、累積表面流去水量(下段グラフ茶実線 : C)、累積水収支(緑実線 : A - B - C)の推移 .

# DP01, Rain event 13



# DP01, Rain event 14

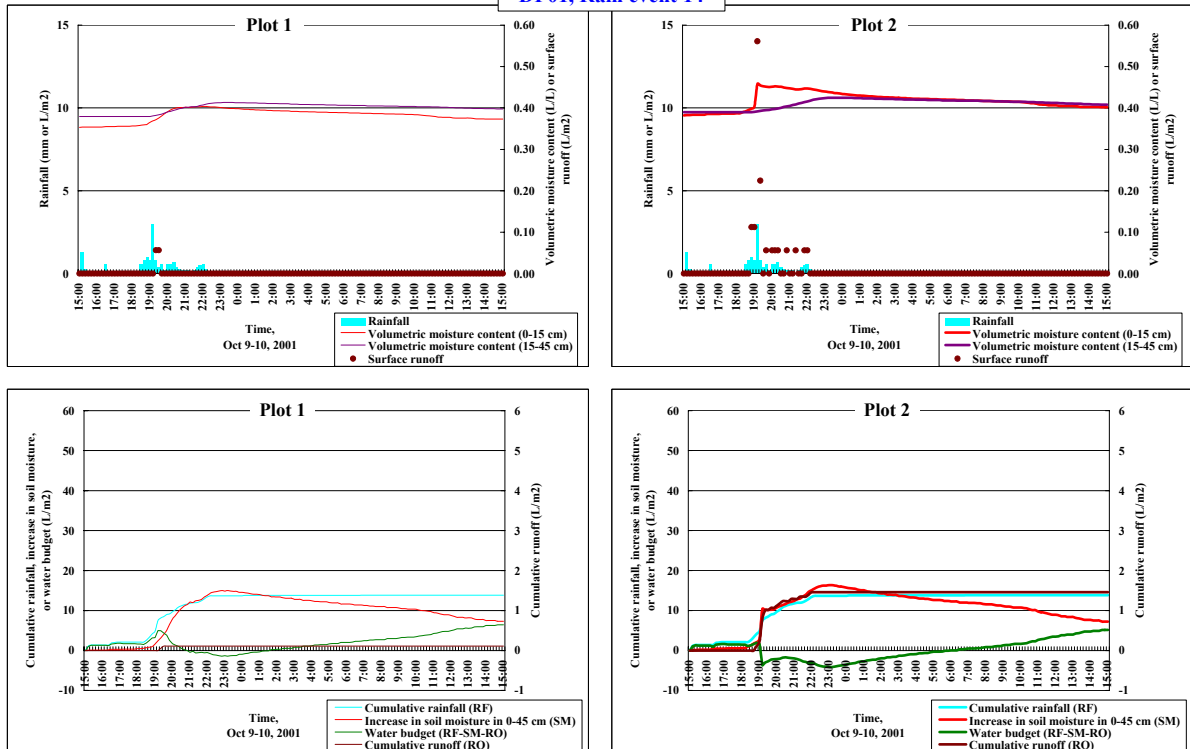
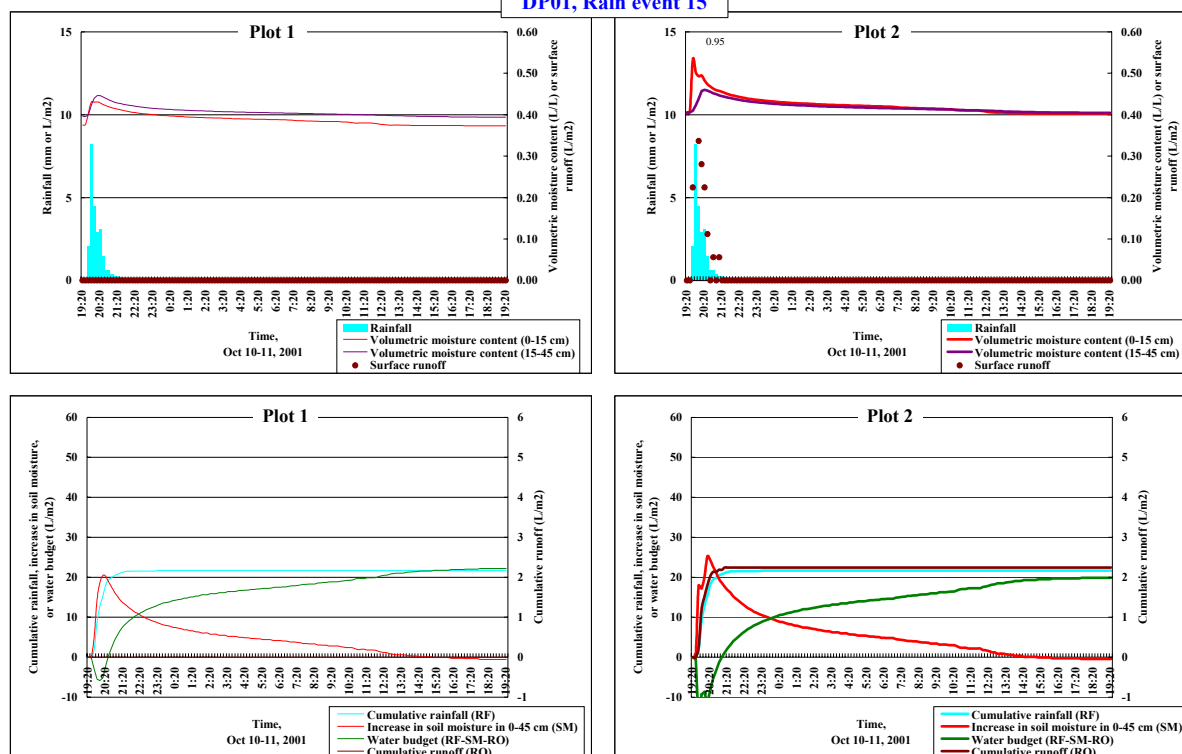


図7(7) . DPにおける各降雨時10分間隔の土壌体積含水率(上段グラフ赤・紫実線)、降雨量(上段グラフ水色縦棒)、表面流去水発生量(上段グラフ茶点)、累積降雨量(下段グラフ水色実線：A)、降雨開始時からの土壌水分増加量(下段グラフ赤実線：B)、累積表面流去水量(下段グラフ茶実線：C)、累積水収支(緑実線：A - B - C)の推移 .



DP01, Rain event 15



DP01, Rain event 16

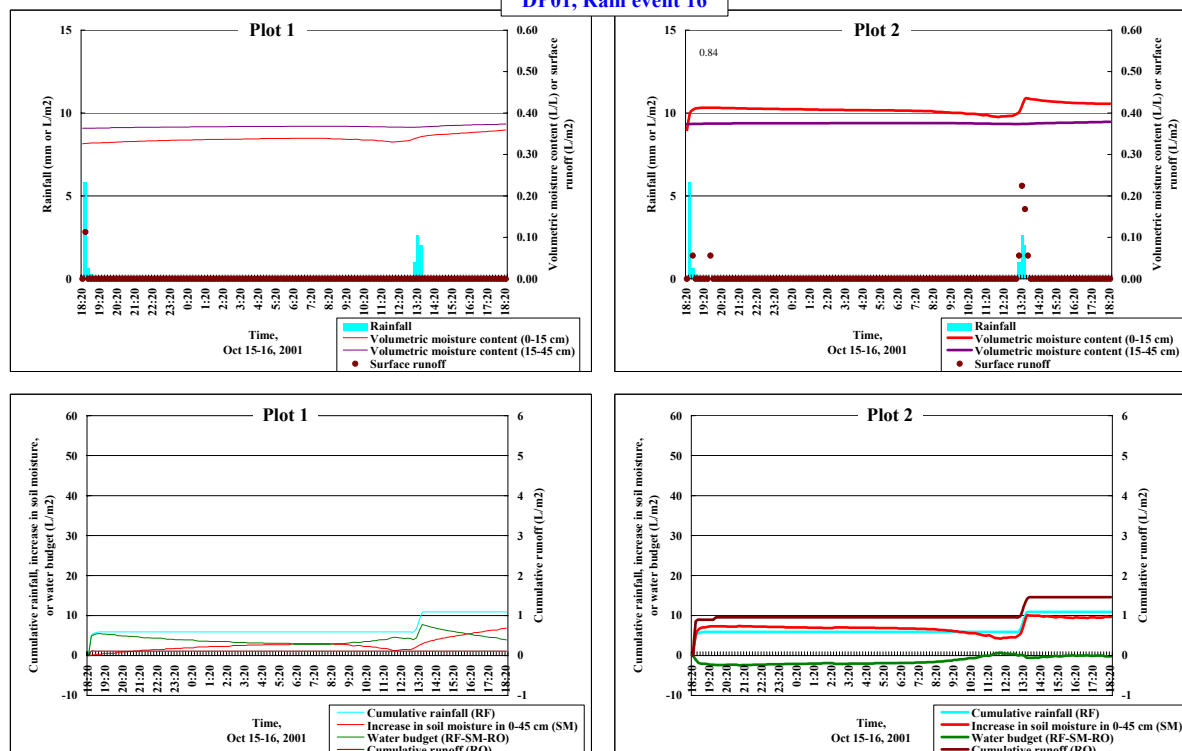
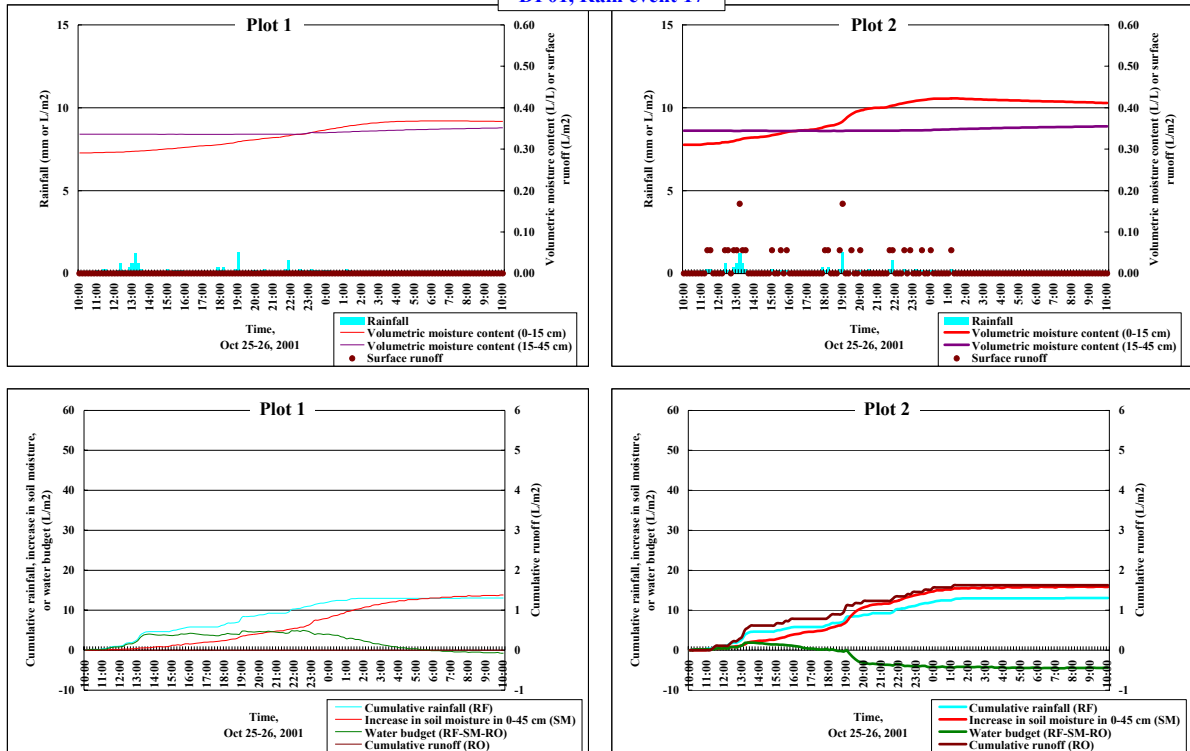


図7(8) . DPにおける各降雨時10分間隔の土壌体積含水率(上段グラフ赤・紫実線)、降雨量(上段グラフ水色縦棒)、表面流去水発生量(上段グラフ茶点)、累積降雨量(下段グラフ水色実線 : A)、降雨開始時からの土壌水分増加量(下段グラフ赤実線 : B)、累積表面流去水量(下段グラフ茶実線 : C)、累積水収支(緑実線 : A - B - C)の推移 .

DP01, Rain event 17



DP01, Rain event 18

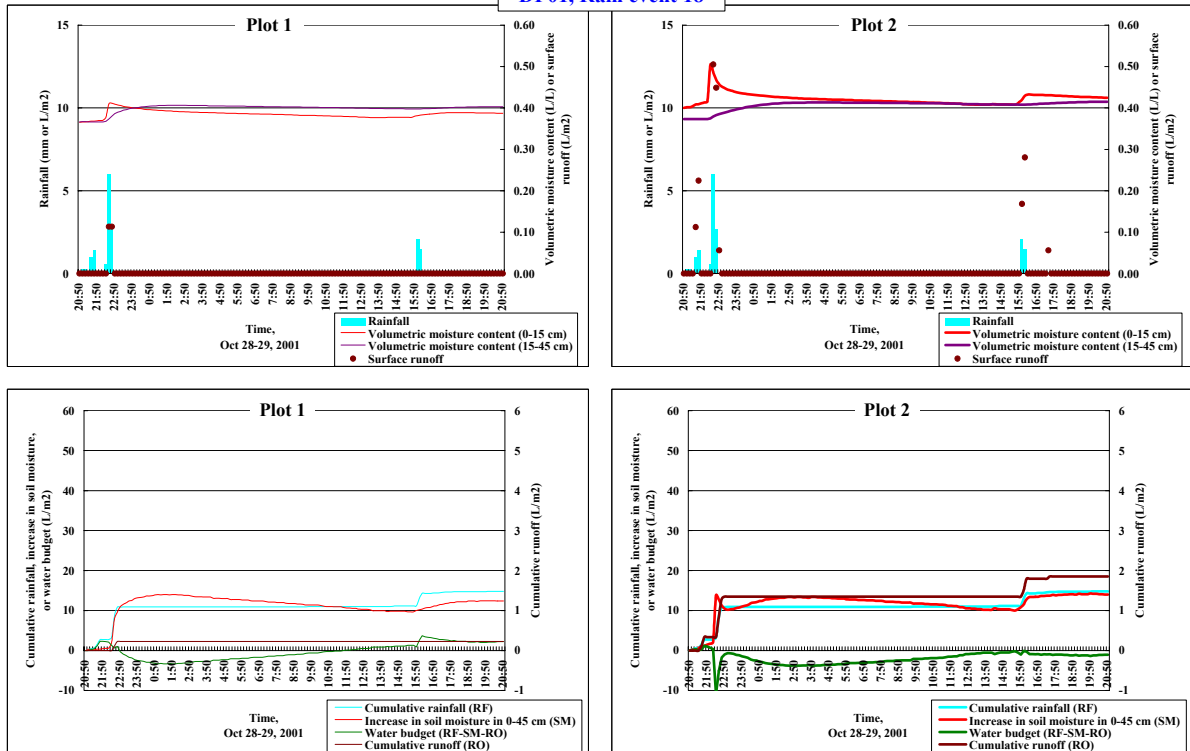


図7(9) . DPにおける各降雨時10分間隔の土壌体積含水率(上段グラフ赤・紫実線)、降雨量(上段グラフ水色縦棒)、表面流去水発生量(上段グラフ茶点)、累積降雨量(下段グラフ水色実線 : A)、降雨開始時からの土壌水分増加量(下段グラフ赤実線 : B)、累積表面流去水量(下段グラフ茶実線 : C)、累積水収支(緑実線 : A - B - C)の推移 .

DP01, Rain event 19

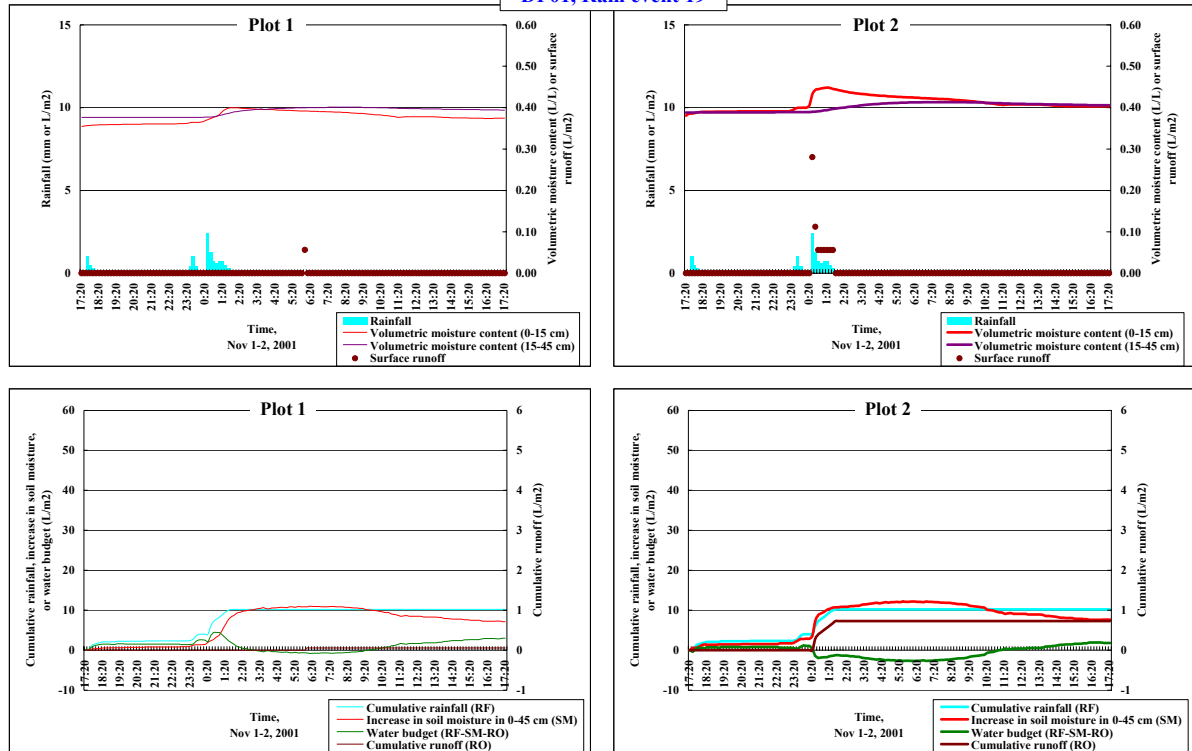


図7(10) . DPにおける各降雨時10分間隔の土壌体積含水率(上段グラフ赤・紫実線)、降雨量(上段グラフ水色縦棒)、表面流去水発生量(上段グラフ茶点)、累積降雨量(下段グラフ水色実線 : A)、降雨開始時からの土壌水分増加量(下段グラフ赤実線 : B)、累積表面流去水量(下段グラフ茶実線 : C)、累積水収支(緑実線 : A - B - C)の推移 .

### 3.6 統計解析に基づく土壌断面からの水分損失発生量および表面流去水発生量規定要因の検討

以下水収支データを用いて、土壌水分損失発生量および表面流去水発生量のシミュレーションを行う。

#### (A) 土壌水分損失発生量

- 1) 3.5 で検討した降雨由来水の動態によれば、降雨開始後数時間に渡って土壌表面滞留水 降雨後の累積水収支の緩やかな減少、すなわち緩慢な土壌水の獲得 の発生していることが示唆された。このような滞留は、ほぼ累積水収支の再上昇の始まる3～4時間後には解消していると見られる。このような滞留水に起因する誤差を消去するため、排水等を含む土壌水分損失量シミュレーションには、4時間間隔のデータを用いることとした。
- 2) 降雨開始後4時間ごとの区分を設け、0-15 cm および 15-45 cm 初期および最終土壌体積含水率(以下 0-15、 15-45)、その間の降雨量(4時間降雨、以下 RF4h)、表面流去水発生量(以下 RO4h)を算出した。理想的には、観測期間中の全データを利用することが可能ではあるが、先述したように TDR 測定では地温の日変動に起因する誤差が実際の土壌体積含水率の微小な変化を検出不能としてしまう。そのためここでの検討には、降雨後重力水が排水されるまで(降雨終了後 24 時間まで)のデータセットを用いた。
- 3) 最終および初期 0-15・ 15-45 の差より、各4時間単位における土壌水分増加量(以下 SM4h)を算出する。また以下のように土壌水分損失量(SM<sub>loss</sub>)を算出した。

$$SM_{loss} = RF_{4h} - RO_{4h} - SM_{4h}$$

ここで SM<sub>loss</sub> が正であれば、土壌水分は排水、蒸発散などを通して失われたことを意味する。一方負であった場合、ここでは考慮されていない何らかの理由で、土壌水分が増加したことになる。ここには、おそらくきわめて強い降雨の際の土壌水分分布の不均一性に起因する TDR 測定値の誤差、斜面上方からの土壌水・表面流去水の予期せぬ流入などが含まれるであろう。以後 SM<sub>loss</sub> が正のもののみ解析に供した。

- 4) これらのデータセットについて、初期 0-15、初期 15-45、RF4h を説明変数、SM<sub>loss</sub>>0 を被説明変数として段階的重回帰分析を行い、土壌からの水分損失発生量を規定する要因について解析した。

#### (B) 表面流去水発生量

- 1) 表面流去水の発生を予測するには、むしろごく短時間のデータセットを用いた方がよいと思われる。そこで降雨開始後 10 分ごとに収集したデータについて、0-15 cm および 15-45 cm 初期土壌体積含水率(以下 0-15、 15-45)、その間の降雨量(10 分間降雨、以下 RF10m)、表面流去水発生量(以下 RO10m)を抽出した。ここでの検討には、降雨後重力水が排水されるまで(降雨終了後 24 時間まで)のデータセットを用いた。
- 2) このデータセットを用いて、初期 0-15、初期 15-45、RF10m を説明変数、RO10m を被説明変数として段階的重回帰分析を行ったところ、ほとんどの場合回帰不能であった。そこで、RO10m を対数変換し(logRO10m)、再度重回帰分析を行った。その結果計 6 プロ

ット中3プロットにおいて比較的よい結果が得られた。なおここで対数変換を行う際、 $RO_{10m}=0$  のデータセットは自動的に除かれている。

以上の重回帰分析の結果得られた係数群を表2に、またシミュレーション結果を図8～11にまとめた。

まず水分損失発生量は、単相関でも降雨量とかなり高い相関が見られた(図8)。すなわち強い降雨時に水分損失発生量は増大する。このことは、ここで用いたデータセットでは、水分損失発生量のうち、降雨時・降雨直後の断面内排水によるものが蒸発散に起因するものに対して卓越するというを示唆する。重回帰分析ではこれに表層土の体積含水率(SJ)、あるいは表層土・下層土双方の体積含水率(NR・DP)を加えることによって、若干の改良( $R^2$ の上昇)が試みられているが、その程度はDPを除いて小さい(図8および図9の比較)。表2によれば、土壌の体積含水率はほとんどの場合水分損失発生量を増大させる方向に寄与しているが、これは対象土壌の透水性が良好であり、土壌が湿潤であるという条件が内部排水を妨げない。あるいはより乾燥時には降雨はまず毛管を満たすことに消費されることを示している。これらの係数群を用いて水分損失発生量を予測した場合、決定係数はほとんどの場合  $R^2 > 0.6$  と満足な結果を与えたが、実測値と推定値の関係は、水分損失発生量が大きい領域で過小評価の傾向が見られることは否めない(図9)。これは従来言われているような強降雨条件下におけるバイパス流発生などにも起因するのかもしれない。

一方表面流去水発生量であるが、これを10分間降雨との関係で見た場合(図10)、降雨強度の増大とともに表面流去水発生量が指数関数的に増大する場合(SJプロット2、NRプロット1、DPプロット2)と、そのような関係が不明瞭な場合(SJプロット1、NRプロット2、DPプロット1)に分けられる。後者の理由ははっきりしないが、表面流去水測定ゲージ

表2．水分損失発生量および表面流去水発生量対数変換値を被説明変数とした段階的重回帰分析( $r=0.15$ )の説明変数群の係数．ただし  $f(x,y,\dots) = ax + by + \dots$  .

			const	rainfall	0-15	15-45	$R^2$	Remarks
Water loss				(4 hr)				
SJ	Plot 1		-0.78	0.39	9.06		0.78	
	Plot 2		-0.41	0.37	9.87		0.70	
NR	Plot 1		-6.78	0.30	7.36	13.47	0.47	
	Plot 2		-6.62	0.47	6.71	12.68	0.69	
DP	Plot 1		-35.66	0.56	-34.16	126.44	0.64	
	Plot 2		-32.36	0.45	45.73	35.99	0.61	
Surface runoff (for log(RO))				(10 min)				
SJ	Plot 1		-1.81	0.06	1.50		0.21	failed
	Plot 2		-1.95	0.15	2.52	-0.92	0.79	
NR	Plot 1		-3.30	0.27	2.71	1.84	0.82	
	Plot 2		-1.65	0.08	5.12	-3.03	0.37	failed
DP	Plot 1		-1.16	0.05			0.10	failed
	Plot 2		-1.25	0.27	-0.82	0.83	0.80	

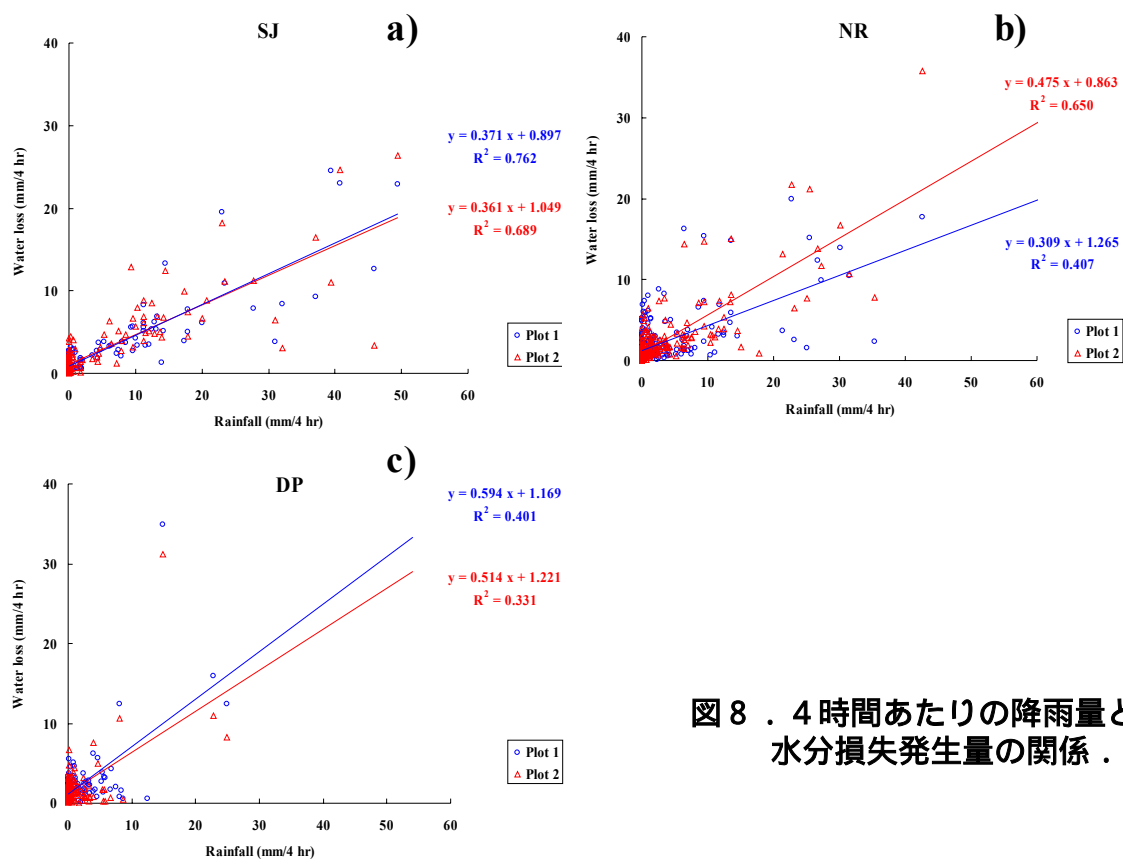


図 8 . 4 時間あたりの降雨量と水分損失発生量の関係 .

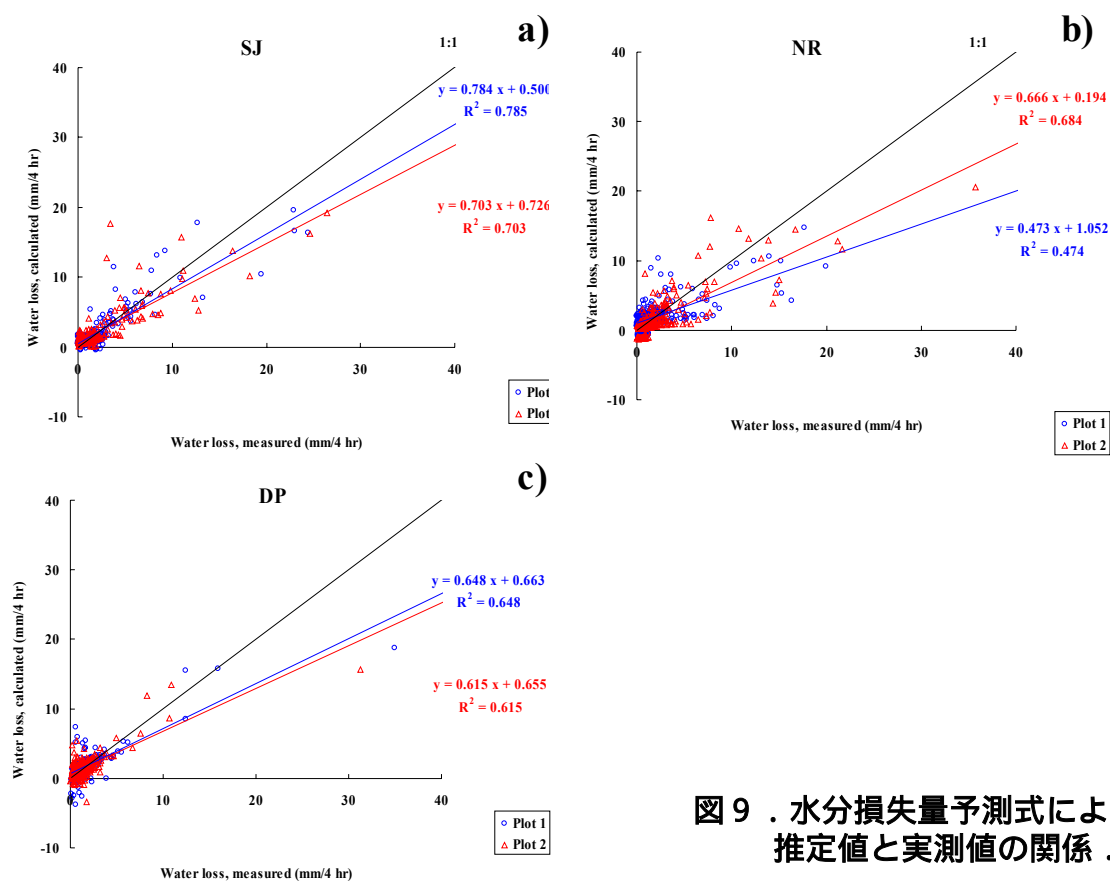


図 9 . 水分損失量予測式による推定値と実測値の関係 .

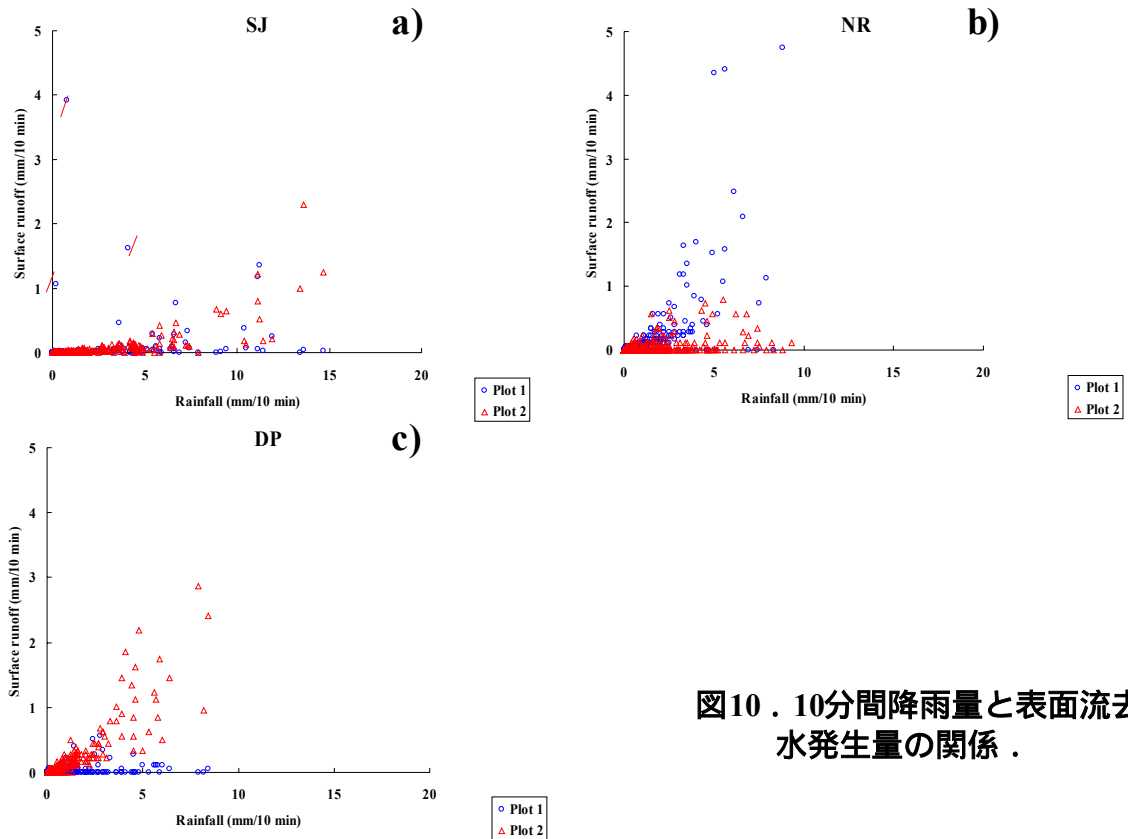


図10．10分間降雨量と表面流去水発生量の関係．

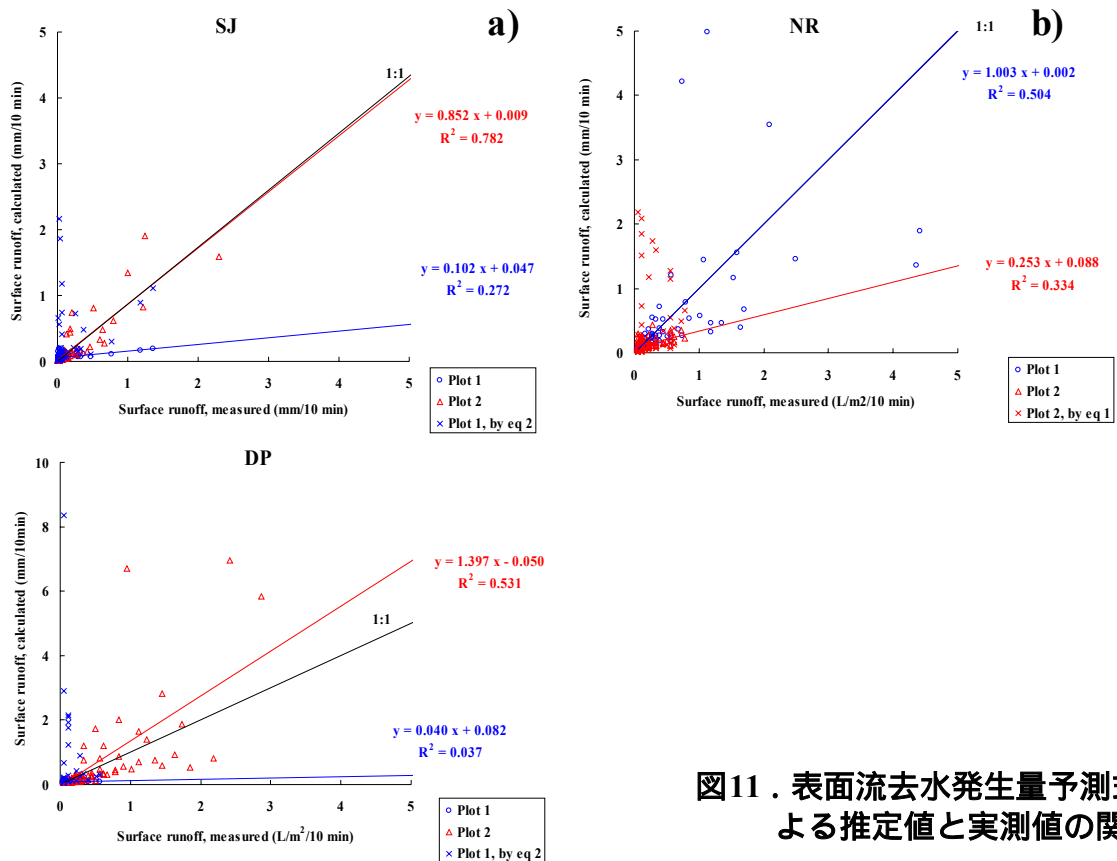


図11．表面流去水発生量予測式による推定値と実測値の関係．

の不具合、あるいは測定期間中にクラスト形成などのによって土壌表面の状態が変化したことなどが理由として考えられる。重回帰分析によって予測の改良を試みた場合、降雨量との間にすでに相関関係が見られた場合には成功しているが、そうでなかった場合予測は失敗した。成功例では、表層土の体積含水率に正の係数を与える場合(SJ プロット 2・NR プロット 1)と負の係数を与える場合(DP プロット 2)が見られたが、後者では負の係数の絶対値は小さく、むしろ表層土の体積含水率はほとんど寄与していないと見るべきであろう。これらの結果は、表層土が湿潤な場合、降雨の土壌への浸透が追いつかず表面流去が発生する、という状況を示している。また SJ プロット 2 で見られた下層土体積含水率の負の効果であるが、これは下層土体積含水率が顕著に増加する雨季後半にはサトウキビ植被が発達するため表面流去水発生は軽減された、という事情を反映しているのではないかと思われる。いずれにしてもここで予測に成功した 3 例では、推定値と実測値の間にほぼ 1 : 1 の関係が見られた。またこれらの予測式を用いて、予測に失敗した 3 例 偶然ではあるが各地点それぞれ 1 プロット のプロットを試みた場合、推定値/実測値 = 1 をはるかに上回る場合が多いことから、これら失敗例では降雨強度や土壌体積含水率から期待されるほど実際には表面流去水が発生していなかったといえる(図 11、×プロット)。予測失敗の主たる理由は、やはり表面流去水測定ゲージの不具合によるものだったのであろう。

### 3.7 雨季全般を通した水分動態の検討

3.6 で得られた予測式および各 4 時間単位のデータセットを用いて、雨季全般を通した降雨由来水分の動態を検討した。本研究で測定あるいは算出された土壌水分損失量は、土壌断面内排水と蒸発散の双方を含んでいる。そこで以下の仮定を用いて、土壌断面内排水を算出した。

仮定 1：本地域における日蒸発散量を 3 mm/d 程度と考え、4 時間降雨が 0.5 mm を超えた場合のみ、その余剰分が断面内排水として失われる。この境界値以下では、降雨由来の土壌水分はすべて蒸発散として費やされる。

仮定 2：下層土が毛管飽和レベルを超えた場合のみ、土壌水は排水される。毛管飽和時の体積含水率は、降雨中に TDR により実測された値の動向より判断した。すなわち SJ プロット 1 で  $\approx 0.24$ 、SJ プロット 2 で  $\approx 0.23$ 、NR プロット 1 で  $\approx 0.41$ 、NR プロット 2 で  $\approx 0.39$ 、DP プロット 1・2 で  $\approx 0.40$  を用いる。この条件は、いわゆる「バイパス流発生を無視する」というものであるが、3.6 でのシミュレーション結果によれば、雨季を通して一～数回の強降雨条件下で観察された若干の過小評価例を除いては、ほぼこの仮定が当てはまると判断される。

このような仮定に基づいて、各 4 時間単位の土壌水分損失発生量を、土壌断面内排水量と蒸発散量に分配し、図 12 と図 13 に月別降雨量実測値と土壌水分損失発生量および土壌断面内排水量の関係として示した。前者ではほぼ 1 : 1 の関係が、また後者では月降水量 100 mm を超えるあたりから余剰水分を排水へ分配する関係がそれぞれ見られた。特に前者で見られた 1 : 1 の関係は、本研究で行った土壌水分損失発生量の推定がほぼ満足できるものであったことを、間接的にではあるが示している。

さらにこれら推定値と降雨量および下層土体積含水率実測値を併せて、雨季期間を通し



た推移として示したものが、図 14～16 である。いずれの地点においても、水分損失は雨季期間を通して発生しているが、今回設定した「降雨量が蒸発散閾値 3 mm/d (0.5 mm/4 hr) を超えかつ下層土が毛管飽和で浸透排水が発生」という条件下では、雨季前期に浸透排水の生じる機会は少ないという予測結果となった。この事情は、水収支の累積量を見ればより明らかである。図 17 には、蒸発散量累積値、浸透排水量累積値、土壌保持水増加量(乾期末計測開始時と比較)、および実測降雨量累積値の推移をまとめて示した(次に検討する表面流去水量は、これらと比べれば十分少ないので、ここでの議論からは外した)。この図においても、累積降雨量の推移は累積水分損失量の推移とかなりよい一致を見せている。ここから以下の点が読みとれるであろう。

- 1) 雨季初期の降雨は、主として蒸発散として失われつつ、一部それまで乾燥していた土壌の毛管水として収容される。逆にこの期間、降雨量に対して土壌断面内排水発生量はそれほど大きくはない。
- 2) 土壌断面内排水発生量は、土壌が毛管飽和される雨季后期に大きくなる。

### 3.8 雨季全般を通した表面流去水発生条件の検討

3.6 で得られた予測式および各 10 分単位のデータセットを用いて、表面流去水発生量予測式の導出に成功した 3 例(SJ プロット 2、NR プロット 1、DP プロット 2)について、雨季全般を通した表面流去水発生量の推移を検討した。なお前述したように、表面流去水発生量予測式導出に際して、被説明変数である表面流去水発生量を対数変換しているため、必然的に予測値は正の値をとっている。しかしながら積算処理においては、出現頻度の大きな表面流去水発生量推定値 0 付近のデータの寄与がきわめて大きくなる。そこで元データを精査して、表面流去水測定ゲージのカウント回数 2 回以上を与えることが稀である

カウント数 1 回は雨量升カウントに対応せず偶然起こりうるため データセットについては、すべて表面流去水発生量 0 として計算した。この閾値は、SJ では 0.5、NR では 0.8、DP では 0.5 mm/10 分間降雨量未満である。その上で土壌水質損失発生量の項での議論に合わせるため、表面流去水発生量推定値を 4 時間ごとに集計した上で、降雨量、表面流去発生量実測値と併せて、図 18～20 に示した。

これらの図に見られる傾向、および 3.6 で導出した予測式の係数群(表 2)より、以下の点が示された。

- 1) SJ プロット 2 では、表面流去水発生量に対して、10 分間降雨量と表層土体積含水率がいずれも正に寄与する(表 2)。すなわち土壌がより湿潤な条件下で強い降雨を受けた場合、雨水が土壌孔隙に収容されきれず、表面流去が発生するようである。3.2 で概観したように SJ では、雨季を通して 10 分間降雨強度分布に明瞭な傾向は見られない。また土壌が砂質で降雨後数日のうちに表層土が乾燥するため、表層土の体積含水率に明瞭な季節変化が見られない。これらの状況より考えて、SJ における表面流去水の発生は、「特に季節性をもたずに強降雨によってもたらされる」と結論されよう(図 18)。
- 2) NR プロット 1 では、SJ プロット 2 と同様、表面流去水発生量に対して 10 分間降雨量と表層土体積含水率がともに正に寄与し(表 2)、また雨季を通して 10 分間降雨強度分布に明瞭な傾向は見られない。ただ SJ とは対照的に、細粒質土壌である NR では、雨季の

進行に伴って明瞭な土壌体積含水率の増加傾向　下層土毛管飽和　全層毛管飽和  
が観察される。このことが引き金となって、しばしば破壊的な表面流去水が発生すること  
は、すでに 3 . 4 でも見たとおりである。図 19 で示すように、雨季初期に実測値は欠  
損しているものの、NR においては、「雨季後期に表層土の毛管飽和に伴い表面流去水発  
生リスクが増大する」と推定される。

- 3) DP プロット 2 では、表面流去水発生量は主として 10 分間降雨量によって規定される(表  
2)。プロット 2 単独の重回帰分析では表面流去水発生量に対して表層土体積含水率はわ  
ずかながら負に寄与するが、3 . 5 で詳細に見たように、表層土体積含水率が低く推移  
するプロット 1 と比べてプロット 2 の表層土体積含水率はかなり高い。おそらく幅広い  
体積含水率範囲では表面流去水発生量に対して表層土体積含水率が正に寄与するが、DP  
プロット 2 では地形的要因により体積含水率がきわめて高い範囲に集中しているためそ  
の効果が隠された、と考えるべきであろう。いずれにしても、各プロットについて見れ  
ば、表層土の体積含水率は雨季開始後早い時期に全層毛管飽和に達し、その後の変化は  
小さい。むしろ DP における特徴は、3 . 2 で見たように、雨季前半と比べて雨季後半  
に強度の大きい降雨が増加する点である。このような本地域に特徴的な降雨パターンに  
よって、DP においては、「雨季後期に強い降雨の増大に伴い表面流去水発生リスクが  
増大する」と結論される(図 20)。

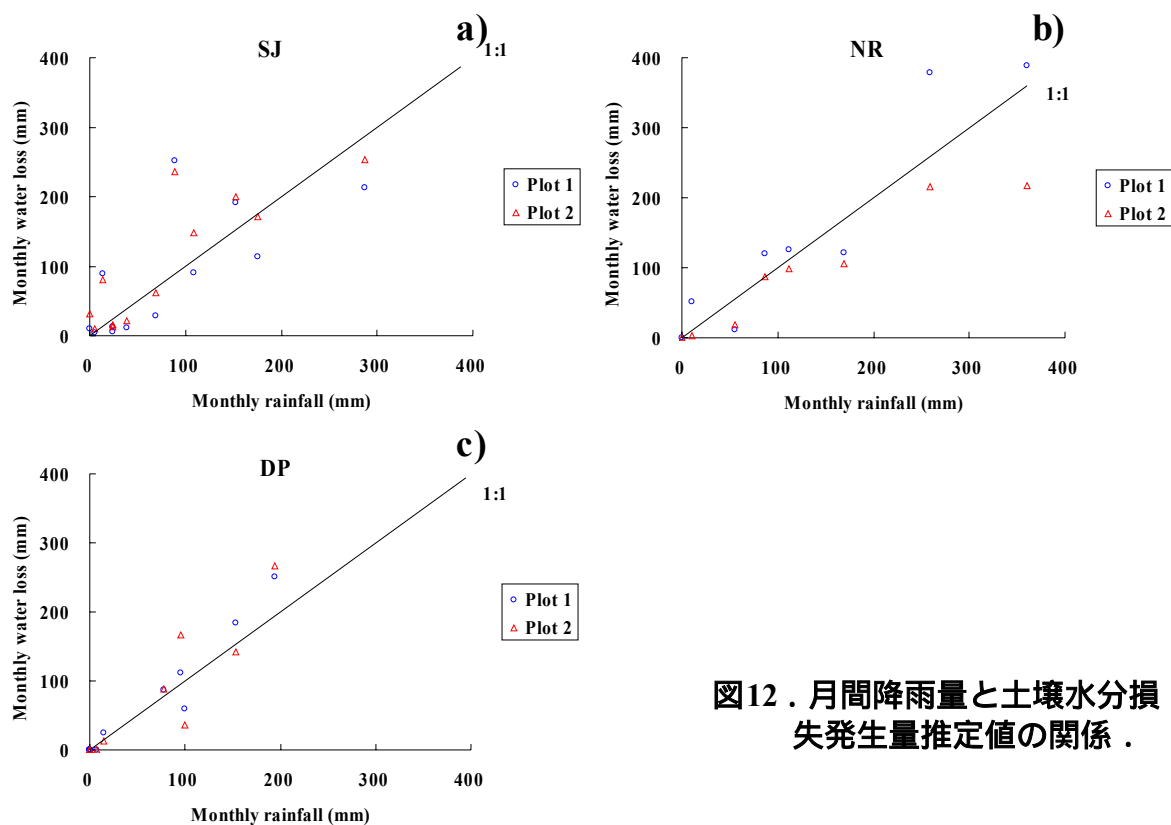


図12．月間降雨量と土壤水分損失発生量推定値の関係．

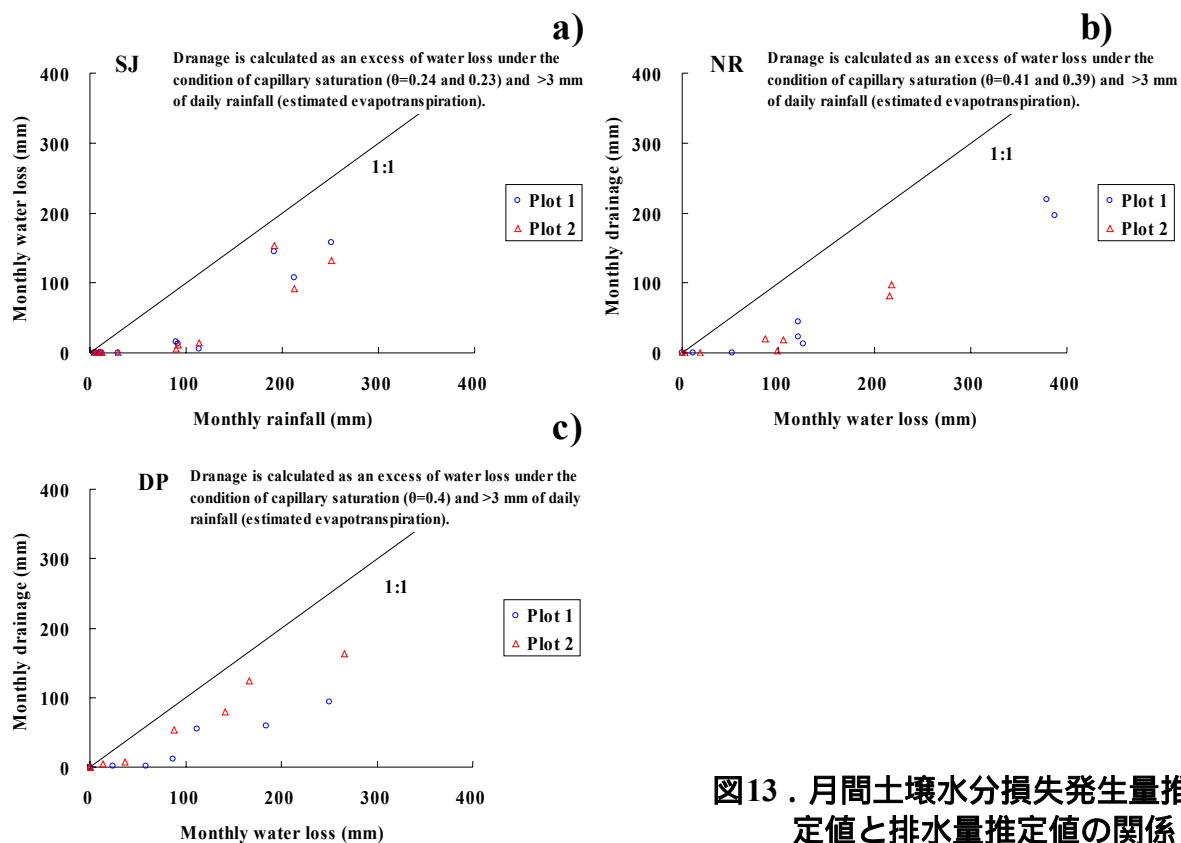


図13．月間土壤水分損失発生量推定値と排水量推定値の関係．

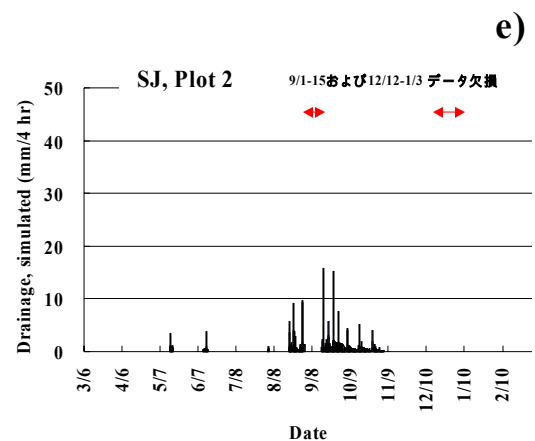
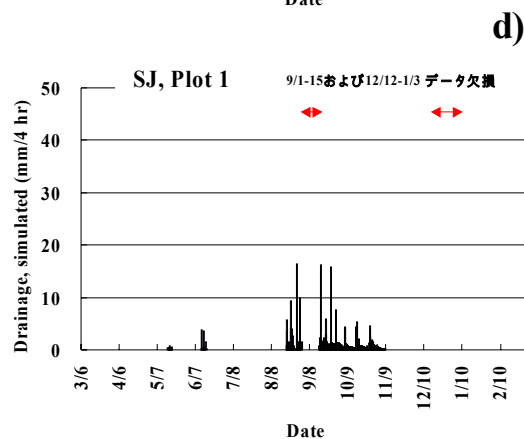
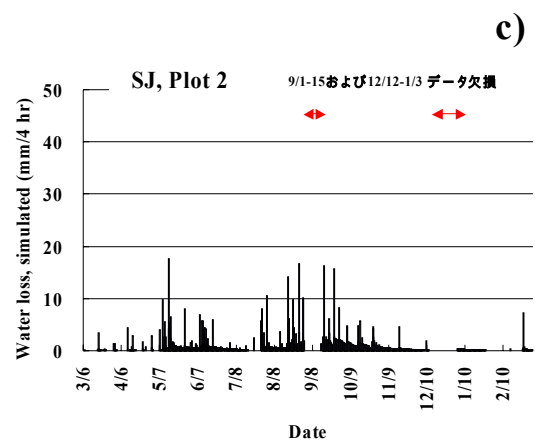
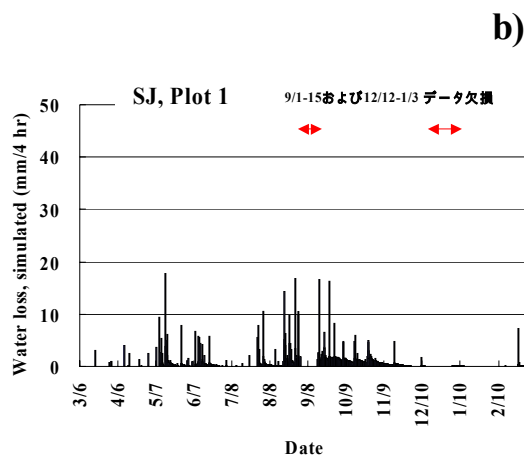
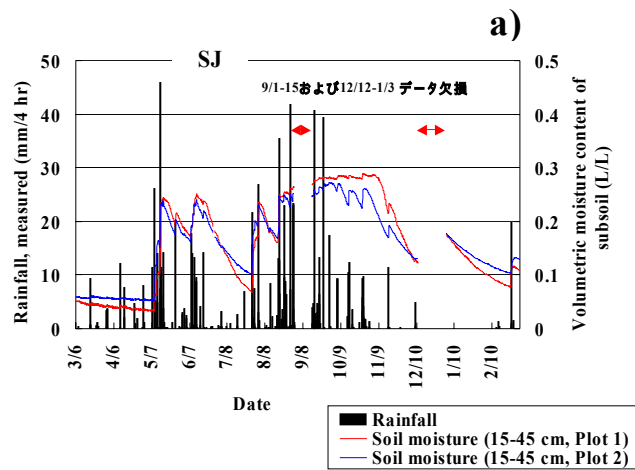


図14 . SJにおける4時間降雨量および下層土壌体積含水率(a)、土壌水分損失量推定値(b,c)、排水量推定値の年間推移(d,e) .

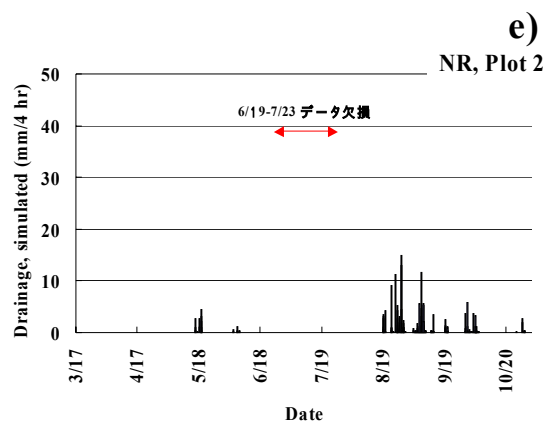
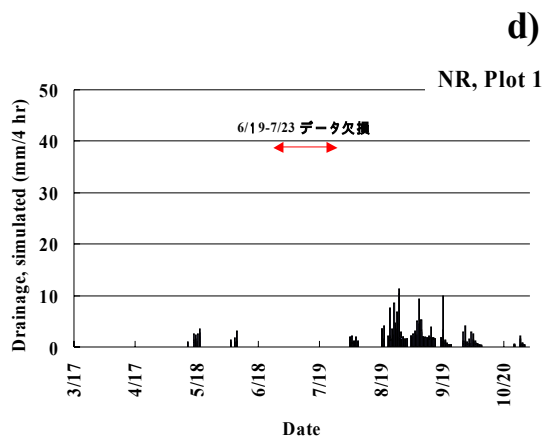
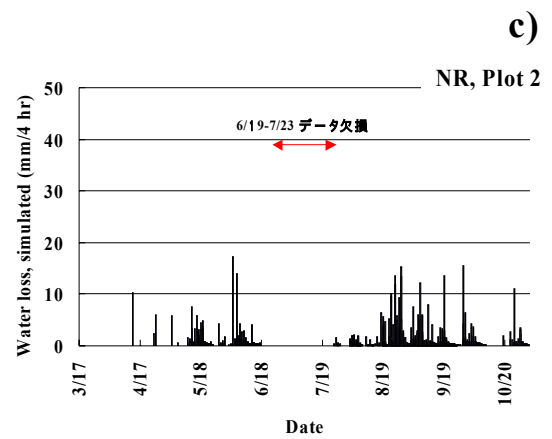
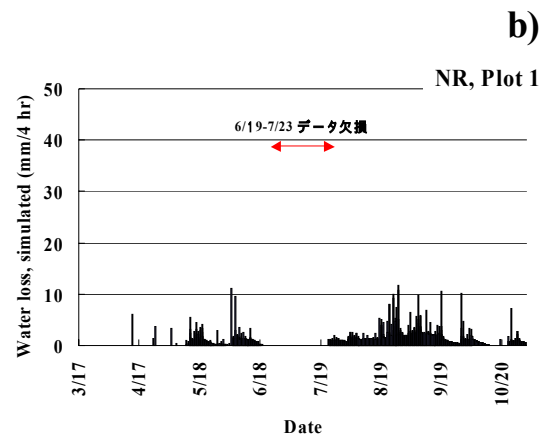
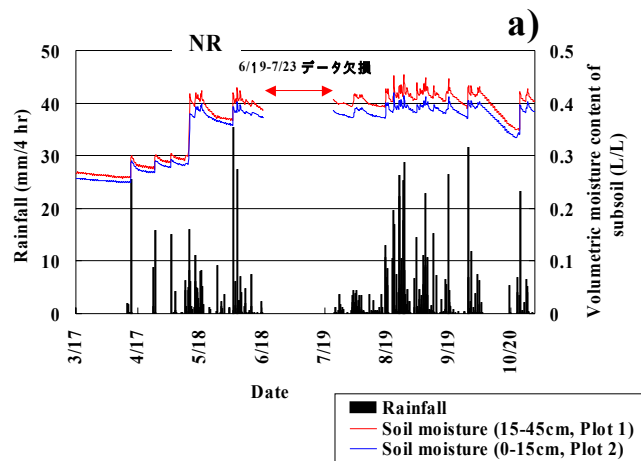


図15 . NRにおける4時間降雨量および下層土壌体積含水率(a)、土壌水分損失量推定値(b,c)、排水量推定値の年間推移(d,e) .

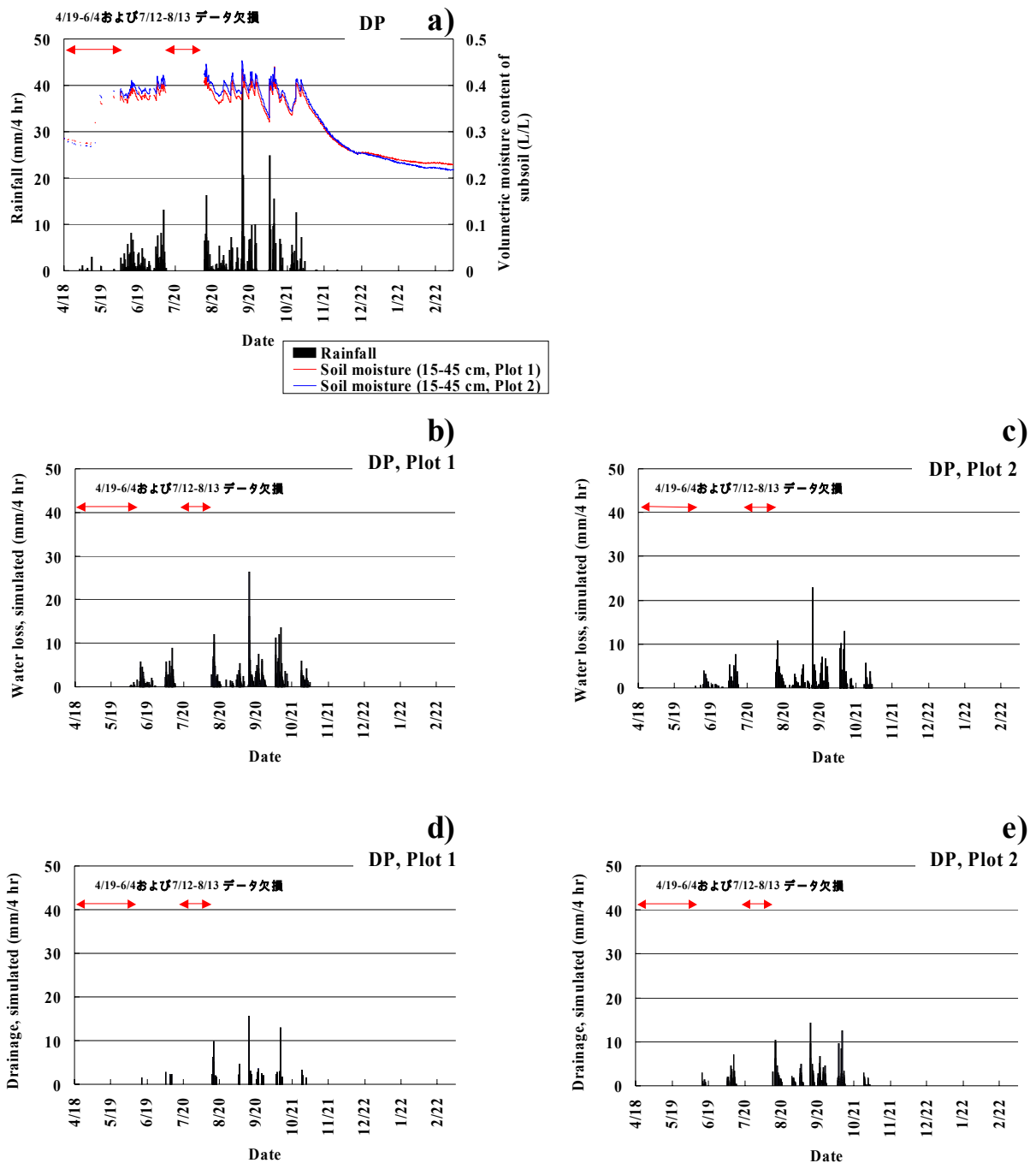


図16 . DPにおける4時間降雨量および下層土壌体積含水率(a)、土壌水分損失量推定値(b,c)、排水量推定値の年間推移(d,e) .

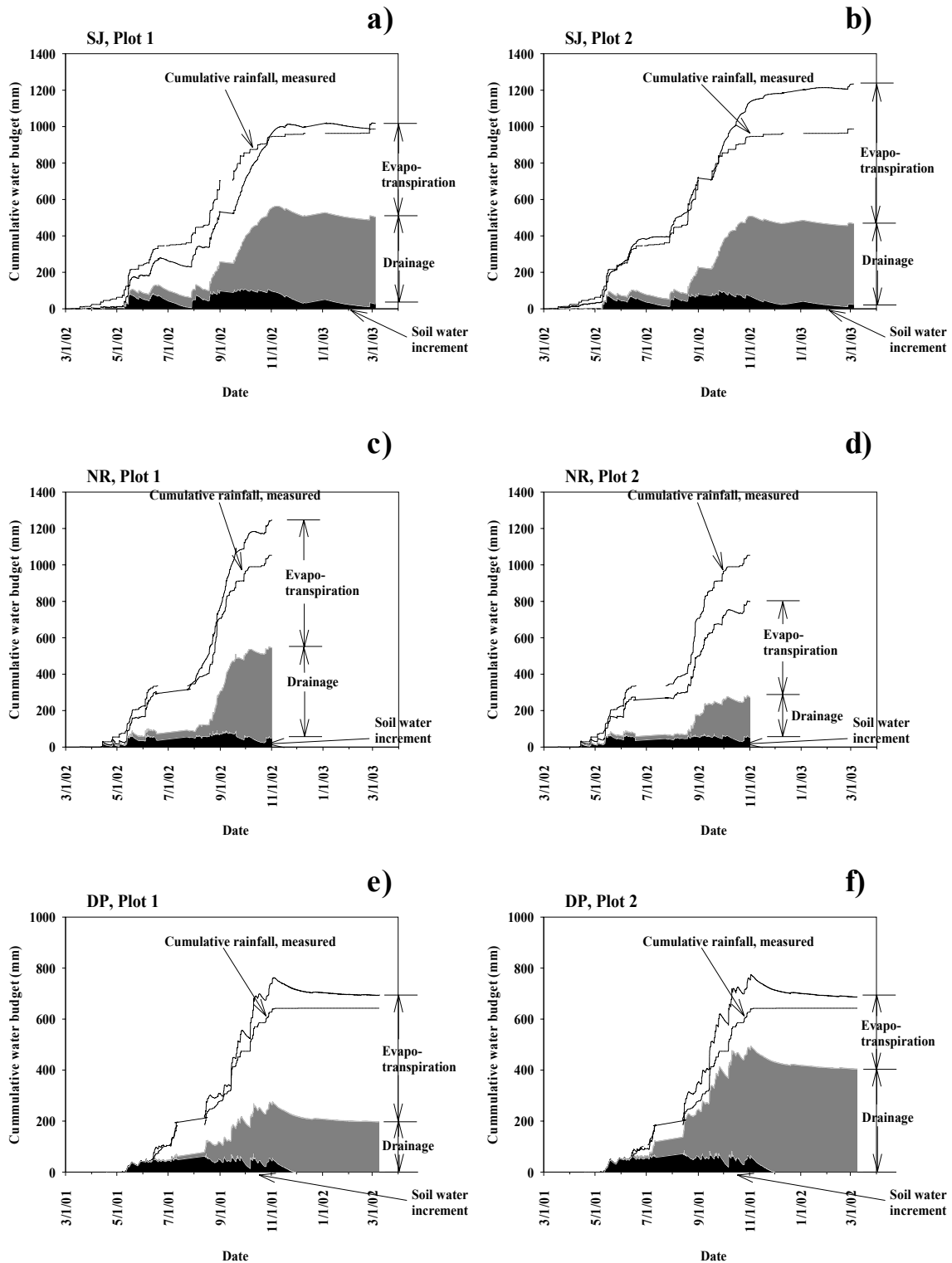


図17 . SJ (a,b), NR (c,d), DP (e,f)における蒸発散量累積値、浸透排水量累積値、土壌保持水増加量(乾期末計測開始時と比較)、および実測降雨量累積値の推移 .

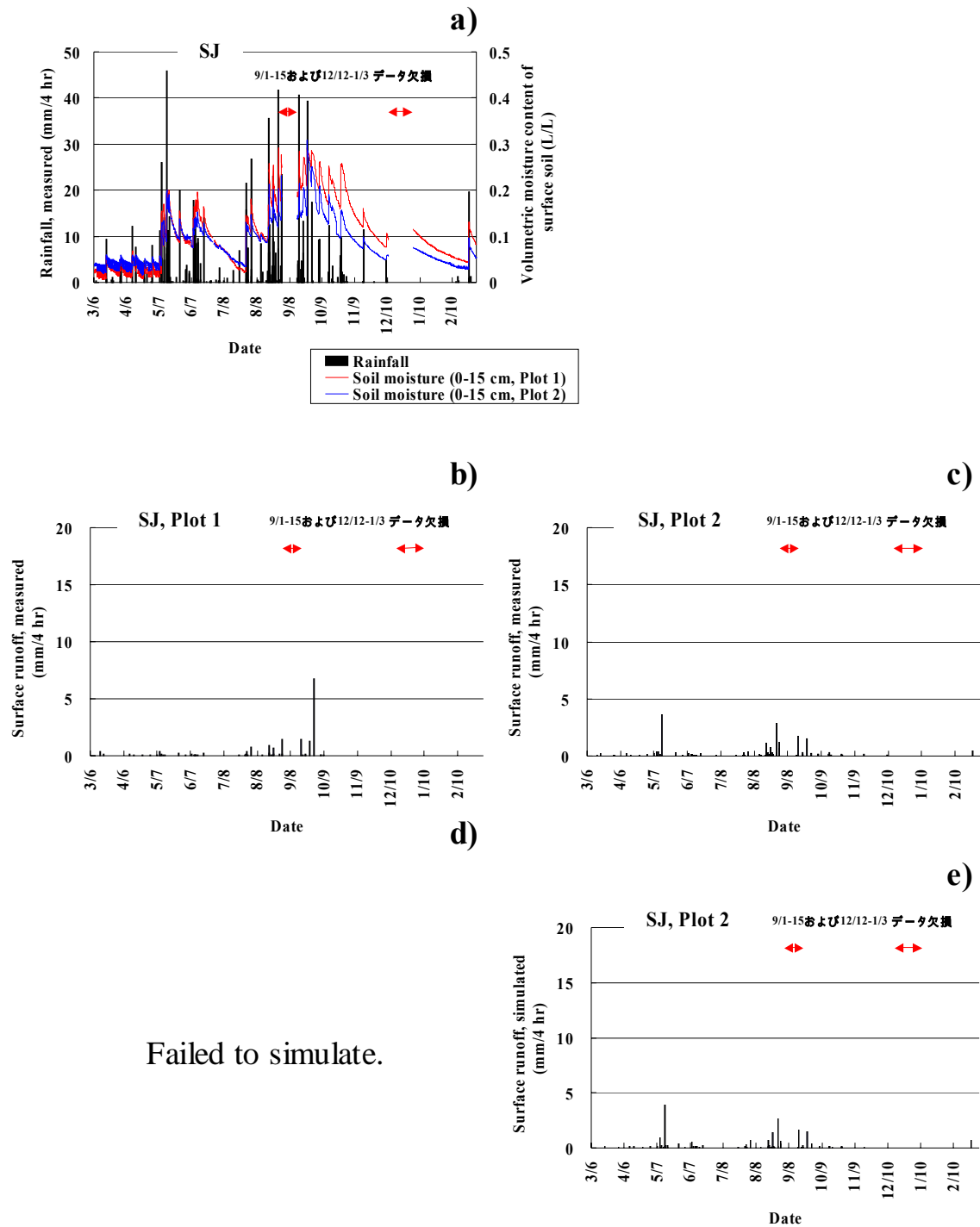


図18 . SJにおける4時間降雨量および表層土壌体積含水率(a)、表面流去水発生量実測値(b,c)、および表面流去水発生量予測値(d,e) .



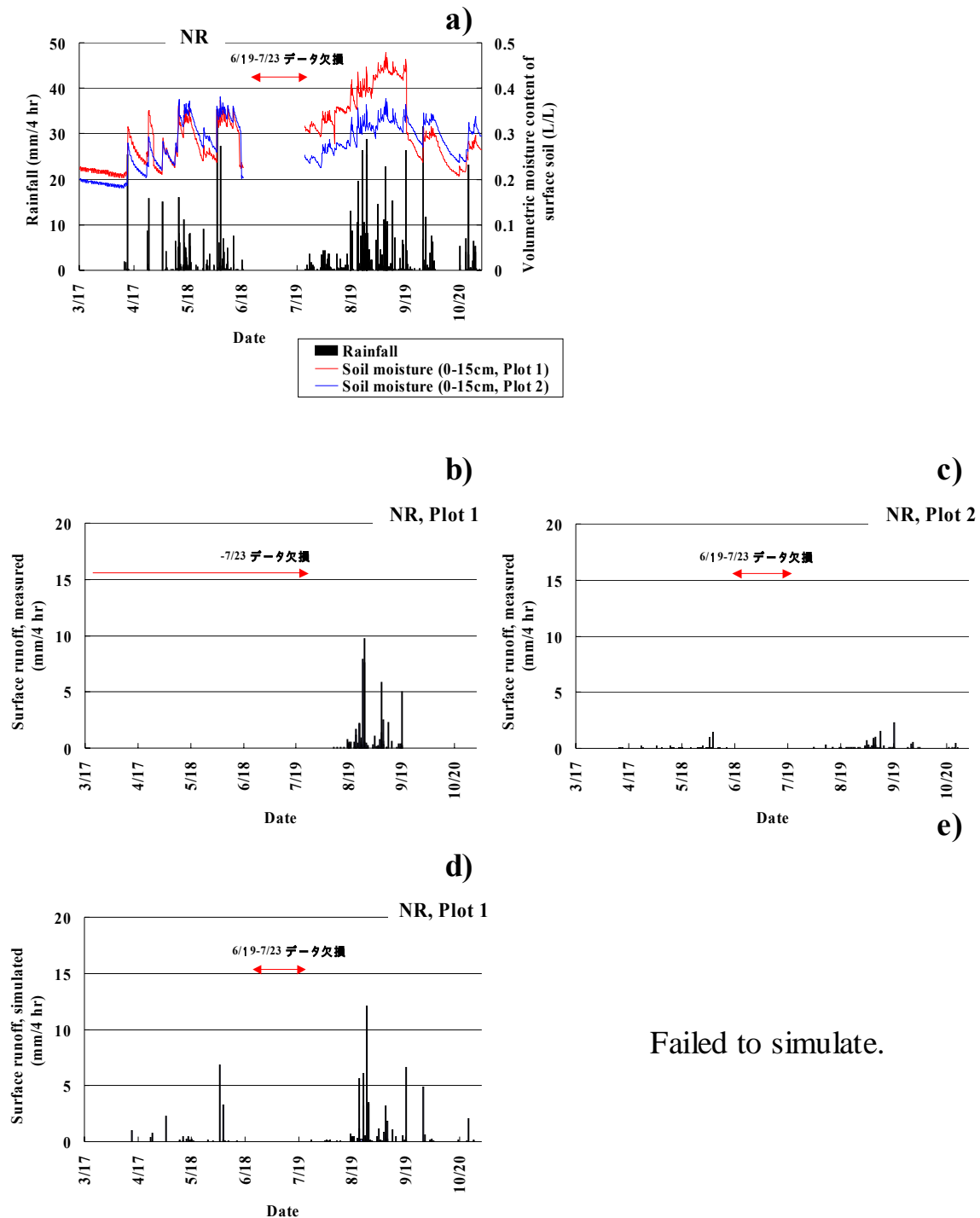


図19 . NRにおける4時間降雨量および表層土壌体積含水率(a)、表面流去水発生量実測値(b,c)、および表面流去水発生量予測値(d,e)。

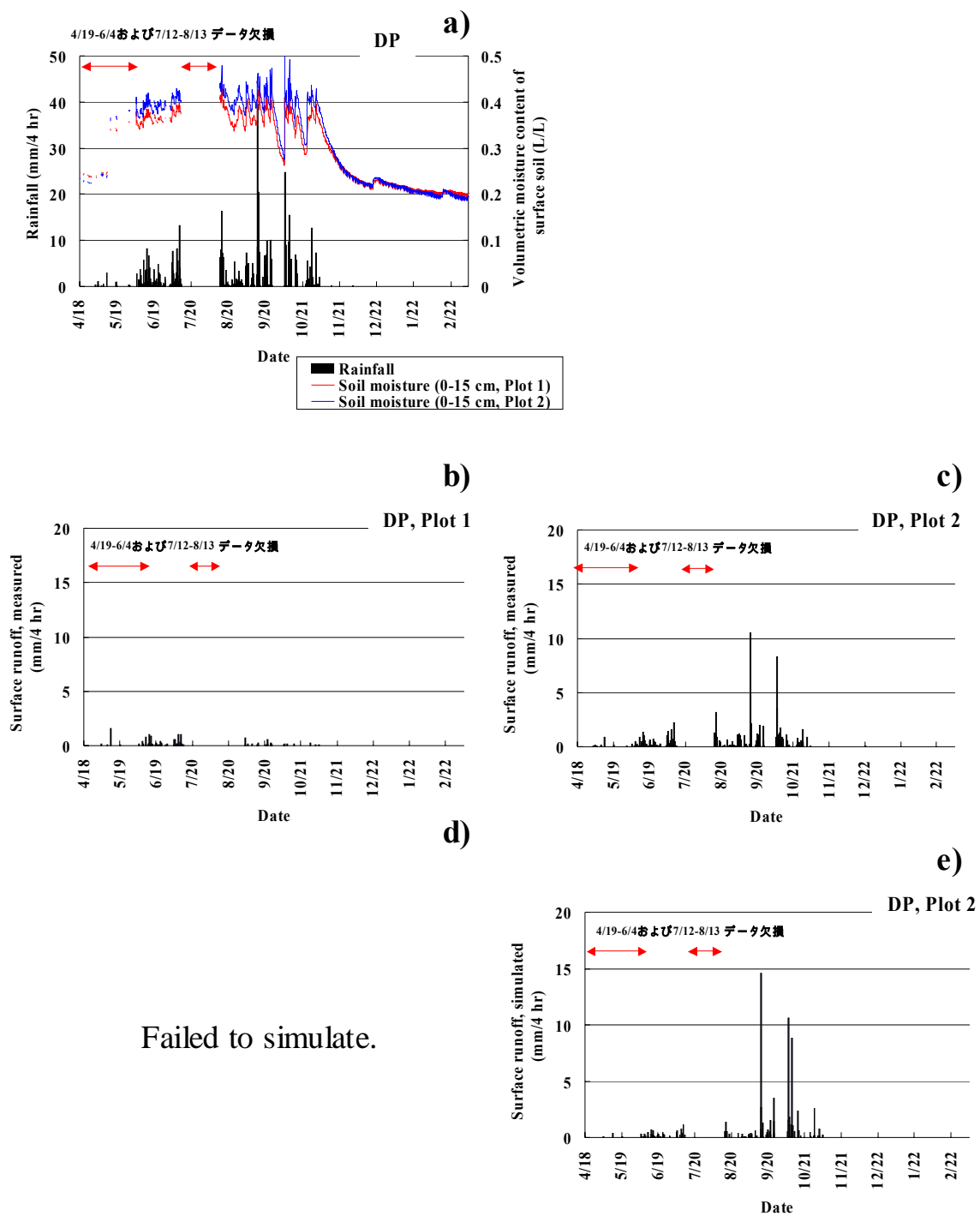


図20 . DPにおける4時間降雨量および表層土壌体積含水率(a)、表面流去水発生量実測値(b,c)、および表面流去水発生量予測値(d,e)。



## 第4章 おわりに

### 表面流去水発生抑制の指針とともに

主として第3章で検討してきた表面流去水発生を含む降雨由来水の動態をまとめると、以下のようなになるであろう。

- 1) 雨季初期の降雨は、主として蒸発散として失われつつ、一部それまで乾燥していた土壌の毛管水として収容される。
- 2) その結果中～細粒質土壌(NR, DP)では、雨季全般を通した土壌体積含水率の増加が見られる。DPでは雨季のごく初期より全層毛管飽和が見られるのに対し、NRでは雨季を通して徐々に下層から表層まで毛管飽和する。一方SJ砂質土壌表層では、排水あるいは蒸発散に起因する水分損失が速やかなため、表層土が常に毛管飽和されるような状況には至らない。
- 3) 土壌断面内排水発生量は、土壌が毛管飽和される雨季后期に大きくなる。
- 4) 北タイ高標高地DPでは、雨季前半と比べて雨季后半に強度の大きい降雨が増加する。
- 5) これらの条件を受けて、各調査地における表面流去水発生リスクは異なる。
  - i) SJにおいては、表面流去は特に季節性をもたずに強降雨によってもたらされる随時強降雨リスク型。
  - ii) NRでは、雨季后期に表層土の毛管飽和に伴い表面流去水発生リスクが増大する雨季后期毛管飽和リスク型。
  - iii) DPにおいては、雨季后期に強い降雨の増大に伴い表面流去水発生リスクが増大する雨季后期降雨強度増大リスク型。

これらの条件および各地で行われている現行農業の実態を考慮すれば、表面流去水発生量抑制を達成するような技術的要素として、以下の視点が挙げられる。

- 1) 一般に受食性が高いといわれる砂質土壌であり、また熱帯地域に共通してみられる強い降雨にさらされるSJでは、表面流去/土壌侵食のリスクはどの時期でも等しく大きい。作付け時期の調節による土壌表面被覆や耕起インパクトを与えるタイミングというような時系列的管理技術によって表面流去水発生を抑制することは困難である。土壌侵食回避には、等高線に沿った侵食防止植生(グラス・果樹等)の植栽あるいはアグロフォレストリーといった空間的土壌侵食回避技術が必要であろう。
- 2) DP村における伝統的な焼畑農耕では、雨季初期に、耕地化直後の微生物バイオマスの急減や一時的な裸地化(森林伐開から陸稲生長による再被覆までの期間)に伴う養分回収能低下および土壌表面の露出を通して、森林下で蓄積された養分の流亡あるいは土壌侵食のリスクが高くなることがわかっている(Hayashi, Y. 2003)。本研究で認められたこの地域独特の降雨パターン分布 雨季初期には弱い降雨が卓越する結果、土壌断面内排水と表面流去水発生リスクのいずれもが雨季初期では小さい は、むしろ結果的に従来の焼畑農耕に見られる雨季初期の生態系の脆弱性を顕在化させない要因として働いた可能性が高い。
- 3) タイ国北部中山間地(NR・DPを含む)では、近年の道路等インフラストラクチャーの整備や、酸性害を回避しうる石灰岩母材土壌の分布、高標高地での温帯作物栽培の優位性などの理由により、高冷地野菜の栽培が広がっている。キャベツ等の温帯性の商品作物

栽培においては、しばしばスプリンクラー灌漑を伴う乾季作が選択されるが、表面流水発生回避という観点からは、雨季後期に耕地を裸地化するような管理は避けるべきである。幸いなことにこれらの地域においては、雨季初期の表面流水発生リスクは、その理由は異なるものの相対的に小さいので、斜面の裸地化をこの時期に限る方向で土地利用がなされるべきであろう。

一般に傾斜地畑作は、養分動態制御の観点からと同様、侵食防止の面からも、その持続性確保には厳しい条件管理が伴うものである。このうち前者に関しては、施肥法の確立といういわば古典的な解決の余地が残されているが、後者については、降雨パターンや土壌の立地条件、土性など、地域によって多様な、しかも改善困難な条件が関わっているため、共通の解決策を提示しにくい。本研究の結果も、従来の伝統的焼畑農耕の合理性の一面を追認するとともに、傾斜地を使った商品作物栽培の可能性について、土壌侵食防止の観点から一定の制限を設けざるをえないものとなった。実際の土壌侵食防止技術の確立に際しては、本研究で考慮しなかった土壌の受食性や斜度・斜面長といった要因を考慮して、地域ごとにしかも総合的になされるべきであろう。

## 参考文献

- Hayashi, Y. 2003: Dynamics of soil organic matter under shifting cultivation in northern Thailand. *In* Master thesis, Kyoto University.
- Soil Survey Staff 1999: Soil Taxonomy, A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys, Second Edition. U.S. Government Printing Office, Washington.
- Sonneveld, B.G.J.S. and Nearing, M.A. 2003: A nonparametric/parametric analysis of the Universal Soil Loss Equation. *Catena*, 52, 9-21.
- Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. 1978: Predicting rainfall erosion losses. Agricultural Handbook 537. USDA, Washington, DC.